»Kraft und Energie«

Kritische Gänge zur Klärung der physikalischen Grundvorstellungen

von

Prof. Dr. W. Walte



Verlag von Otto Hillmann / Leipzig / 1926

»Kraft und Energie«

Kritische Gänge zur Klärung der physikalischen Grundvorstellungen

von

Prof. Dr. W. Walte



Verlag von Otto Hillmann / Leipzig / 1926

Druck von Dr. F. Poppe in Leipzig.

Vorwort.

Zur Begründung, daß die Kultur des Abendlandes mit ihrem faustischen Gepräge ihren Abschluß gefunden hat, hat Oswald Spengler darauf hingewiesen, daß mit dem Tode Heinrich Hertz' nichts von erheblicher wissenschaftlicher Bedeutung in der Physik geleistet worden sei. Erfolgte der Zufluß der Erkenntnis in dauernd gleichmäßigem Strome und schlössen sich nicht, wie die Erfahrung lehrt, an das stürmische Vorwärtsdrängen zu einer Zeit Jahrzehnte der Sammlung und Ruhe an, könnte dieser Schluß vielleicht berechtigt erscheinen. Aber dann müßten auch die Bemühungen nach dem Suchen neuer Erklärungen für die Erscheinungen fehlen. Aber daß sich diese grade in der letzten Zeit stark vermehrt haben, spricht nicht gerade für Spenglers These.

Es ist nicht so auffällig, daß dem Höhepunkte der Ausgestaltung der Energievorstellung eine Zeit der Gedankenebbe folgte, ohne daß diese Ebbe eine gar zu lange Dauer zu haben braucht, und vor allem ohne daß sie nicht wieder von einer neuen Flut abgelöst werden könnte. Die Geistestätigkeit während der Flut ist im Wesentlichen intuitiv, wie jeder große Fortschritt auf einer Intuition beruht. In der Ebbezeit ist das Denken diskursiv und deckt die Lücken und Mängel auf, die z. B. der Energievorstellung noch anhaften können, ohne jedoch zu einer neuen Erkenntnis den Weg zu finden. In der Zeit der Hochflut wird die Kultur weiter gefördert, während der Ebbe die Zivilisation ausgebaut. In dieser letzteren Zeit wird auch ein Kampf durchgeführt zwischen der durch den neuen Gedanken gebildeten Einsicht und den Resten der alten Vorstellung, aus der der neue Gedanke den Fortschritt der Wissenschaft entwickelt hat. Dieser Fortschritt ist aber erst dann vollkommen sichergestellt, wenn die Vorstellungen, aus denen er abgeleitet ist, mit ihm ganz in Einklang gebracht worden sind.

Was die Energie betrifft, ist dies Ziel bis jetzt nicht erreicht worden. Die Energievorstellung ist aus den Vorstellungen der Kraft und der aus ihr abgeleiteten Arbeit entwickelt worden; aber die Auseinandersetzung zwischen Energie und Kraft ist nicht erfolgt. Man hat sich mit der Formel begnügt, daß die Energie das Produkt aus Kraft und Weg sei, daß also eine Größe bestimmter Art, also eine benannte Zahl das Produkt zweier anders benannten und auch unter sich verschieden benannten Zahlen sei, was mit unserer Logik in Widerspruch steht. Man ist nicht zu der Erkenntnis durchgedrungen, *daß auch die Kraft nichts anderes als eine Energie ist und daß jede Veränderung im Naturgeschehen allein auf der Verlagerung von Energie beruht.*

Meines Erachtens steht allen Versuchen, einen neuen Fortschritt in der Physik anzubahnen, die Schwierigkeit im Wege, die das Verhältnis zwischen Kraft und Energie dem wissenschaftlichen Denken bietet; und ich habe die Überzeugung, daß die Nichtüberwindung dieser Schwierigkeit die Ergebnislosigkeit der bisherigen Versuche zum Fortschritt bildet. Die vorliegende

Schrift befaßt sich mit der Lösung des genannten Problems, setzt sich zunächst mit der Natur der osmotischen und der elektrischen Energie und dann mit der der potentiellen Energie auseinander mit dem Ergebnisse, daß es nur kinetische Energien gibt, und bringt neue Auffassungen von Osmose, Elektrizität, Kohäsion, Adhäsion, chemischer Affinität, Kapillarität, Oberflächenspannung, Licht, Gravitation, Zweck der Verbrennungswärme, ohne die Vorstellung der Kraft im alten Sinne zu benutzen und um dagegen nur mit der Vorstellung der Energie auszukommen. Dabei ist sie leicht verständlich geschrieben und dürfte allein aus diesem Grunde manchem Wahrheitsucher Wertvolles bringen. Denn das Verständliche kann auf seinen Wert oder Unwert leicht nachgeprüft werden, während das Unverständliche dafür sorgt, daß sein Gedankeninhalt schwer erforscht und somit ein Gedankenfehler nur mit Mühe aufgedeckt werden kann. Auch in der Wissenschaft wird es zum Teil aufgenommen nach dem Gedankengange, den der Kirchenvater Augustin in die Worte faßt: Credo, quia absurdum est.

Um auf Spengler zurückzukommen, ist sein Schluß auf den Untergang der Kultur des Abendlandes nicht begründet. Daß unser intuitives Denken, die Quelle jedes Fortschrittes, nicht erloschen ist, dafür ist Spengler selbst das schlagendste Beispiel. Sein Buch ist eine einzige große Intuition, durchwebt mit diskursivem Denken; nur dürften sich gegen die letzteren Teile manche Einwendungen machen lassen. Nach meiner Ansicht hat es bisher nicht drei verschiedene Kulturen gegeben, denen in Zukunft eine vierte andersartige folgen kann; sondern es gibt für die Völker der Erde nur e i n e, wenn sie auch ursprünglich aus verschiedenen Quellen entsprossen sein mag. Sie hat das Ziel, die Vorgänge in der Natur, zu der auch der Mensch gehört, dem menschlichen Verständnis zugängig zu machen, sei es, daß es sich um die rein physikalischen Zusammenhänge der leblosen Natur und der lebendigen Wesen handelt, sei es, daß sie die durch das Zusammenleben der Menschen untereinander und mit den Tieren und Pflanzen bedingten Gesetze zur Erkenntnis bringt. Aber diese Erkenntnisse sind ursprünglich immer intuitiv und wecken in den Denkern faustische Empfindungen, wenn diese einen Kampf gegen eigene liebgewordene Erkenntnisse oder fremde Vorurteile, womöglich unter Gefahr ihrer bürgerlichen Existenz oder ihres Lebens, zu bestehen haben. Auch im Altertum war die Kultur in diesem Sinne faustisch: man braucht nur an Sokrates, Plato und Aristoteles zu denken. Und eine neue Erkenntnis, die sich in Widerstreit zu der bisher geltenden stellt, wird es immer geben, wenn auch die Gebiete, über die sich der Geisteskampf ausbreitet, sich verengen mögen.

Inhalt des Buches

---

1. Abschnitt:

Die osmotische Energie.

2. Abschnitt:

Die Bedeutung der Großmolekel in der Physik.

3. Abschnitt:

Der galvanische Strom, eine kinetische Energie.

4. Abschnitt:

Die Diffusionsvorgänge im Elektrolyten.

5. Abschnitt:

Die Vorgänge in den Muskeln und Nerven.

6. Abschnitt:

Die elektrische Energie ist kinetisch.

7. Abschnitt:

Die potentielle Energie.

8. Abschnitt:

Die Elektronen.

9. Abschnitt:

Einsteins Relativitätstheorie.

10. Abschnitt:

Die Abweichungen meiner Naturauffassung von der anderer Forscher.

---

1. Abschnitt.

Die osmotische Energie.

1 Der wichtigste Fortschritt in der Entwicklung der Naturwissenschaft des vorigen Jahrhunderts fiel in die Mitte desselben und bestand in der Aufstellung des Gesetzes von der Erhaltung der Energie, welches in unmittelbarer Verbindung mit der Erkenntnis stand, daß die Wärme eine Art Bewegung ist. Da man alle anderen Energien in Wärme überführen konnte, so konnte man sie auch durch diese Wärme messen und sonst die verschiedenen Energien miteinander auf ihre Größe vergleichen. Und da man auch die Wärme wieder in andere Energien überführen konnte, so gelang es, den Nachweis zu liefern, daß die Wärme, die man aus der Umwandlung einer Energie gewonnen hatte, auch ausreichte, die erste Energie in ihrer ganzen Größe wiederzuerhalten. Damit war das Gesetz von der Erhaltung der Energie begründet. Da aber die Wärme eine Bewegungsgröße ist, die durch m und v, nämlich durch $^1/_2 mv^2$ bestimmt ist, so lag die Vermutung nahe, daß auch jede andere Energie durch $^1/_2 mv^2$ gemessen werden könnte; und es stellte sich die Aufgabe, dieses m und dieses v aufzusuchen. Man hatte dann die Aussicht, in das Wesen der noch nicht erkannten Energien z. B. der Elektrizität und der Gravitation einzudringen und dem Verständnis der Naturkräfte näherzukommen. Aber schon bei der Gravitation setzte die Schwierigkeit ein, daß die Größe derselben nicht von der Masse des einen Körpers allein abhängig schien, sondern von zwei Massen, so daß die Energie von dem Produkte zweier Massen bestimmt wurde, also sozusagen, dem Quadrate einer Masse proportional war; und das Gleiche galt von der Elektrizität. Man half sich nun damit, die Energien in zwei Gruppen einzuteilen, in solche, deren Wesen als kinetisch, also als auf Bewegung beruhend, nachgewiesen werden konnte, — und das waren Wärme, Schall, lebendige Kraft — und solche, bei denen dieser Nachweis nicht möglich war. Diese vereinigte man unter dem Sammelnamen potentieller Energie, wobei das Wort potentiell andeuten sollte, daß sie Arbeit leisten könnte, während man noch nicht imstande war, das wahre Wesen aufzudecken. Die Bezeichnung: potentiell ist also im wesentlichen negativer Natur. Aber die Einführung dieses Wortes hat den Nachteil, gebracht, daß sich der menschliche Geist mit ihm befriedigt zeigte und das Nachforschen nach der wahren Natur ruhen ließ. Der natürliche Gedanke mußte doch sein, daß, wenn jede Energie in Wärme oder mechanische Arbeit übergeführt werden könne, sie auch durch m und v bestimmt werden müsse, und daß die Aufgabe zu lösen sei, für jede potentielle Energie die entsprechende Masse und Geschwindigkeit aufzufinden. Nun beschränkte man sich darauf, die Arbeitsfähigkeit einer Energie als ihr entscheidendes Wesen aufzufassen, nicht aber ihr inneres Wesen zu ermitteln; und man kam eigentlich zu dem Verzichte,

die potentiellen Energien als vorstellbare mechanische Größen anzuerkennen. Es lag ein neues „ignorabimus" vor, das Dubois-Reymond noch nicht verkündet hatte.

2 Derjenige, der von der nach meiner Ansicht natürlichen Entwicklung am einflußreichsten abgedrängt hat, ist gleichzeitig einer der Hauptbegründer der Energielehre gewesen, Helmholtz, indem er in seiner 1881 in London gehaltenen Gedächtnisrede auf Faraday die Lehre von den elektrischen Elementarquanten mit ihren anziehenden und abstoßenden Kräften aufstellte. Trotz aller großen Bedenken, die gegen diese Quantentheorie geltend gemacht werden können, beherrscht sie die wissenschaftliche Welt; und daher wird es schwer sein, die Bahn für die gekennzeichnete Richtung wieder freizumachen.

Es wird nun dienlich sein, Umschau zu halten, ob nicht irgendein elektrischer Vorgang ohne diese Elementarquanten und zwar auf rein mechanischem Wege erklärt werden kann; man darf dann hoffen, daß auch weitere Vorgänge in ähnlicher Weise erfaßt werden und demnach der potentiellen Energie ein Wohnplatz nach dem anderen entzogen wird.

Nun hat schon im Jahre 1889 Nernst in einer Arbeit die elektrische Energie der Konzentrationsketten auf eine andere Energie, die osmotische, zurückgeführt, die zwar bisher auch noch als eine potentielle angesehen wird, von der aber hier gezeigt werden soll, daß sie rein kinetisch ist. Gelingt dieser Nachweis und gelingt es zugleich, einen Mechanismus aufzufinden, der die elektrische Wirkung aus der der Osmose zugrunde liegenden kinetischen Energie hervorgehen läßt, so ist auf diesem Gebiete die elektrische Energie als kinetisch erwiesen. Nernst würde dieses Ziel auch haben erreichen können, wenn er das Wesen der osmotischen Energie richtig erfaßt hätte. Aber er hat sich damit begnügt, diese als etwas Gegebenes, nicht mehr Aufzuklärendes, also als potentiell anzusehen und hat damit nicht eine Unbekannte auf eine Bekannte zurückgeführt, sondern auf eine andere Unbekannte und somit die Hauptaufgabe nicht gelöst.

3 Wir werden uns nun mit den osmotischen Erscheinungen kurz bekannt machen müssen. Bekannt war schon am Anfang des vorigen Jahrhunderts, daß, wenn die Lösung eines Salzes von ihrem Lösungsmittel Wasser durch eine Membran getrennt wurde, durch diese hindurch ein Austausch der Flüssigkeiten stattfindet. Der Durchtritt des Wassers wird an der Zunahme der Lösung, der der gefärbten Lösung an der Färbung des auf der anderen Seite befindlichen Wassers erkannt. Von Wasser wird mehr durchgelassen als von der Lösung. Ordnet man daher den Versuch so an, daß sich die Lösung oberhalb der, eine Röhre unten abschließenden Membran, das Wasser unterhalb derselben in einem weiteren Gefäße befindet, so steigt die Lösung in der Röhre infolge der Flüssigkeitszunahme in die Höhe, während das Wasser in dem weiteren Gefäße sinkt, und ruft auf der Membran durch ihr Gewicht einen Überdruck von oben nach unten über den Druck des Wassers unterhalb der Membran hervor. Und da die Niveaudifferenz zwischen Lösung und Lösungsmittel nicht wieder — wenigstens nicht sofort — ausgeglichen wird, so muß eine Energie vorhanden sein, die diesen Zustand erhält. Diese Energie nennt man den osmotischen Druck. Bei der besprochenen Anordnung ist der Überdruck von oben nach unten gerichtet; der das Gleichgewicht haltende osmotische Druck muß daher von unten nach oben, also vom Wasser nach der Lösung gerichtet sein.

4 Diesen osmotischen Druck suchte man zu messen. Da aber durch die Membran die Flüssigkeiten nach beiden Seiten durchdrangen, so hatte man es mit der Differenzwirkung zweier Drucke zu tun. Ein Meßversuch

konnte daher nur dann als rein angesehen werden, wenn nur das Wasser, nicht aber die Lösung durch die Membran trat. Man suchte daher nach solchen Membranen, die man als halbdurchlässig bezeichnete, und glaubte, eine solche in einer Haut von Kupferferrozyanid gefunden zu haben; man schrieb ihr die Eigenschaft zu, nur das Lösungsmittel Wasser, nicht die Lösung, z. B. Kupfersulfat in Wasser, durchzulassen. Traube hat diese Niederschlagsmembran zuerst erzeugt am Ende einer Glasröhre; da diese sich aber als zu leicht zerstörbar erwies, hat Pfeffer sie im Innern der Wandungen eines porösen Tonzylinders erzeugt und sie dadurch einigermaßen widerstandsfähig gemacht. Als nun Pfeffer auf den oberen, offenen Rand des Tonzylinders eine dicht abschließende Trichterröhre mit dem engeren Röhrenteil nach oben setzte, so stieg in dem letzteren die Lösung hoch empor, wenn nur dafür gesorgt wurde, daß auf der oberen Seite der Membran immer dieselbe konzentrierte Lösung erhalten wurde. Um dies zu bewirken, wurde auf den Boden des Tonzylinders Kupfersulfat in fester Form gelegt, welches sich ständig bis zur Sättigung der unteren Schicht löste. Der Druck konnte dann durch die Höhe der Flüssigkeitssäule oberhalb der Membran gemessen werden. Noch einfacher gestaltete sich der Versuch dadurch, daß man den Tonzylinder oben schloß und an der Seite ein oben geschlossenes Manometer anbrachte. Pfeffer konnte durch seine Versuche feststellen, daß der osmotische Druck der absoluten Temperatur proportional und außerdem der Konzentration der Lösung, also auch der Masse des gelösten Stoffes in der Volumeinheit proportional ist.

Bald hinterher hat der Botaniker de Vries die Osmose der Pflanzenzellen studiert und dabei festgestellt, daß, wenn lebende Pflanzenzellen in eine zehnprozentige Salpeterlösung getaucht werden, der Inhalt der Zelle Wasser an die Lösung abgibt, so daß sich der sonst dicht an der Zellwand anliegende Protoplasmaschlauch von ihr ablöst. Für ihn ist dieser Protoplasmaschlauch die halbdurchlässige Membran, die Salpeterlösung entspricht dem Kupfersulfat von Traube, die Zellflüssigkeit dem Wasser. Nun benutzte er auch Lösungen anderer Salze und suchte den Prozentgehalt der Lösungen dieser Salze zu bestimmen, die noch eben ausreichten, um die Loslösung der Protoplasmahaut einzuleiten. Er stellte dabei fest, daß gleich wirkende Salzlösungen solche sind, die in der Volumeinheit gleich viele Molekeln der verschiedenen Salze enthielten. Er nannte diese Lösungen gleichwirkend oder isotonisch und sagte, daß äquimolekulare Lösungen isotonisch seien. Er kam also zu einem ähnlichen Ergebnisse wie Pfeffer, daß der osmotische Druck von der Anzahl der Molekeln des gelösten Stoffes in der Volumeinheit abhängig ist.

Nun benutzte van't Hoff die von Pfeffer ermittelten Zahlen für den osmotischen Druck einer Zuckerlösung und verglich sie mit dem Druck eines Gases, das in der Volumeinheit ebensoviele Molekeln enthält, wie die Lösung Molekeln des festen Stoffes und fand, daß beide gleich waren. Also scheinen die in der Lösung befindlichen Molekeln fester Substanz genau so stark zu drücken, wie die Molekeln der Gase. Da nun der Druck eines Gases seinen Grund in der mittleren kinetischen Energie seiner Molekeln hat, so lag es nahe, der kinetischen Energie der Molekeln des gelösten Stoffes die Ursache des osmotischen Druckes zuzuschreiben. Es bildete sich daher die, besonders von Arrhenius vertretene Lehre aus, daß die kinetische Energie der Molekeln der gelösten Substanz die unmittelbare Ursache des osmotischen Druckes sei; und seit ungefähr 40 Jahren beherrscht diese Ansicht die wissenschaftlichen Anschauungen.

Diese Ansicht ist aber sicher falsch; denn die über der Membran befind-

liche Lösung enthält die Molekeln fester Substanz, die, wenn sie isoliert sein sollten, dieselbe durchschnittliche kinetische Energie wie die Wassermolekeln haben und dann einen Druck ausüben müßten, der von ihren Stößen, also von innen nach außen ausginge und in bezug auf die Membran von oben nach unten wirkte. Der osmotische Druck aber geht, wie gezeigt worden ist, von unten nach oben, also in gerade entgegengesetzter Richtung. An dieser Tatsache kann man nicht vorübergehen. Wenn auch die Größe des osmotischen Druckes mit dem hypothetischen Druck der festen Partikeln in der Lösung übereinstimmt, so sind doch ihre Richtungen genau entgegengesetzt. Und daran ändert auch nichts die von van't Hoff angegebene ideale Maschine, die er zur Erklärung des osmotischen Druckes heranzieht.

5 Van't Hoff denkt sich in einer vertikalen, unten geschlossenen Röhre eine Lösung und auf ihrer Oberfläche eine halbdurchlässige Membran und darüber Wasser. Ist der Druck dieser Wassersäule auf die Membran geringer als der nach seiner Meinung von der Lösung ausgehende osmotische Druck, so behauptet er, daß sich die Membran heben müsse. Ist der Druck der Wassersäule größer, so müsse sie sich senken. Im ersteren Falle würde die Konzentration der Lösung soweit abnehmen, daß der, sich gleichzeitig mit vermindernde osmotische Druck die verkürzte Wassersäule tragen könne. Im letzteren Falle würde sie soweit steigen, daß wieder Gleichgewicht zwischen beiden Drucken erzielt würde. Die Maschine würde sich also automatisch richtig einstellen. Eine weitere Erklärung von seiten van't Hoffs liegt nicht vor, auch nicht der sehr notwendige Nachweis, daß zwischen dem wachsenden osmotischen Druck und dem Druck der wachsenden Flüssigkeitssäule ein Gleichgewicht eintreten muß. Prüft man nun die Wirkung der Maschine von seinem Standpunkte aus, so muß in dem Falle, daß der Wasserdruck geringer ist als der osmotische Druck von unten nach oben, dieser letztere einen Überdruck gegen die Membran ausüben; aber daraus folgt nicht, daß die Membran gehoben wird. Denn da sie halbdurchlässig ist, muß Wasser der Lösung durch die Poren der Membran gedrückt werden und sich über der Membran lagern; dann muß sich die Membran automatisch senken, da unter ihr ein leerer Raum entstanden ist, und nicht umgekehrt. Ist aber der osmotische Druck geringer als der von oben nach unten wirkende Druck der über der Membran ruhenden Wassersäule, so ist er gar nicht imstande, diesen Wasserdruck zu überwinden und vermag daher auch nicht, die Membran zu heben. Sein Gedanke steht also mit unseren allgemeinen physikalischen Vorstellungen in Widerspruch. Dann ist auch die Membran gar nicht halbdurchlässig in seinem Sinne. Denn er fordert von ihr, daß sie im ersten Falle dem Wasser der Lösung den Durchgang gestattet, im zweiten Falle dem Wasser des Lösungsmittels. Da aber das Wasser der Lösung mit zur Lösung gehört, so ist seine Membran nicht einseitig durchlässig. Er fordert auch von seiner Membran, daß sie den ganzen osmotischen Druck aufnehmen soll, daß also die Maschen in derselben geschlossen sind, die den Druck sonst auf die obere Flüssigkeitsschicht übertragen würden, und kann doch auf das Offensein dieser Maschen nicht Verzicht leisten, da im anderen Falle die Membran weder auf- noch absteigen kann.

Zur Erläuterung der Vorgänge beim osmotischen Versuch, der erklärt werden soll, kann die Maschine aus zwei Gründen nicht herangezogen werden, einmal, weil in der idealen Maschine die Flüssigkeiten grade umgekehrt angeordnet sind wie beim wirklichen osmotischen Versuch; denn bei allen osmotischen Versuchen mit offenen Glasröhren wird das Wasser unter der Membran, die Lösung über derselben angebracht, während sich bei ihm die Lösung unterhalb, das Lösungsmittel oberhalb der Membran befindet;

und zweitens sind die Oberflächen von Wasser und Lösung beim osmotischen Versuch frei beweglich; die eine kann sich senken, während die andere sich hebt; in der idealen Maschine lagert auf der Lösung nur durch die Membran getrennt, das Wasser. Die Lösung ist also in ihrer Bewegung beschränkt.

6 Während van't Hoff auf Grund seiner idealen Maschine den Sitz des osmotischen Druckes in die Molekeln des in der Lösung befindlichen festen Stoffes legt, nimmt er in seinen Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie als Sitz des Druckes die trennende Membran an und biegt damit von dem Wege ab, zu dem ihn das Ergebnis seiner Rechnung geführt hatte. Welche Vorstellung bildete er sich nun über diese Membran? Sie wird von ihm als absolut halbdurchlässig angesehen; d. h. sie soll dem Lösungsmittel in jedem Falle den Durchweg gestatten, der aus dem Lösungsmittel und dem festen Salze gewonnenen Lösung, auch bei großen Verdünnungen, den Durchgang verwehren. Dieses äußerst merkwürdige Verhalten sucht er auch in keiner Weise verständlich zu machen. Bei dicken Membranen wie Schweinsblase, kann man an einen Mechanismus nach Art der Ventile denken, wenn auch eine solche Vermutung nichts beweist; auch müßten diese Ventile nicht, wie allgemein angenommen wird, einseitig wirken, sondern nach beiden Seiten; denn es ist gleichgültig, welche der beiden Flächen der Membran der Lösung zugewandt ist. Aber ganz dünne Häutchen, die nur aus wenigen Zellenschichten bestehen, können unmöglich solche Mechanismen enthalten; und nun zeigte sich noch, daß, je dünner die betreffende Membran war, um so weniger von der Lösung durchgelassen wurde, daß also mit der Einfachheit des Baues der Membran ihre Halbdurchlässigkeit wuchs. Sollte man der anorganischen Haut ein Wahlvermögen zuschreiben, den Durchgang zu verwehren oder zu erlauben? Das ist eine zu absonderliche Vorstellung; und doch scheint sie manche Forscher beherrscht zu haben und noch zu beherrschen. Das ist aber als ein Rückschritt zum Hylozoismus, zur Wiederbelebung der leblosen Natur anzusehen. Eine derartige Annahme dürfte aber doch allein unter der einen Voraussetzung gewagt werden, daß diese „halbdurchlässigen" Membranen nur dem Lösungsmittel den einseitigen Durchlaß gewähren. Nun sind aber alle Membranen der leblosen Natur, soweit sie darauf untersucht sind, nur am Anfang des Versuches halbdurchlässig, und je mehr Versuchszeit verflossen ist, um so weniger. Daher kann die Membran als solche nicht die Ursache der Erscheinung sein; sondern diese muß in den besonderen Vorgängen liegen. Nun dringt am Anfang das Lösungsmittel mit großer Gewalt an allen Stellen durch die Membran hindurch; je höher aber die Flüssigkeitssäule im Zylinder gestiegen ist und durch ihren Druck das weitere Aufsteigen von Flüssigkeit erschwert, um so langsamer drängt diese nach; dann hört aber auch die Halbdurchlässigkeit auf; die Lösung verteilt sich auf beide Seiten der Membran. Daher ist die anfängliche einseitige Durchdringung der Membran auf die einseitige Bewegung des Lösungsmittels zurückzuführen, die es verhindert, daß von der anderen Seite Teilchen durchdringen, die nach den Gesetzen der Diffusion sonst durch dringen könnten.

Wenn auf einem Flusse die Eisdecke aufbricht und ein Boot entgegen den in Bewegung befindlichen Eismassen den Strom hinauffahren will, so wird es zurückgetrieben. Kommt aber die Bewegung dieser Eismassen einmal zur Ruhe, etwa zur Zeit der beginnenden Flut an der Mündung des Flusses, so kann ein starkes Boot die Eismassen nach allen Richtungen durchqueren. Aber auch wenn die ganzen Eismassen in nur schwacher Bewegung sind, kann ein Boot, wenn auch unter großen Schwierigkeiten, am Ufer stromaufwärts kommen, da es am festen Ufer noch immer einen Halt findet, der es

vor dem Zurücktreiben schützt. Ebenso kann auch eine Membran in ihren Poren durch Adhäsion eine einzelne Molekel festhalten, wenn auch der Strom des Lösungsmittels noch nicht völlig abgeschwächt ist; und diese Molekel kann allmählich durch die ganze Dicke der Membran hindurchwandern und sich im Lösungsmittel ausbreiten. So erklärt sich die Ganzdurchlässigkeit der Membran schon zu einer Zeit, wo das Lösungsmittel noch durch die Membran strömt. Ist erst der Gleichgewichtszustand zwischen Lösung und Lösungsmittel erreicht, ist also der Zeitpunkt eingetreten, in welchem die Lösungsoberfläche nicht mehr steigt, dann wirkt nur allein noch die Diffusion, die schließlich den Unterschied zwischen Lösung und Lösungsmittel aufhebt, die Flüssigkeiten im engeren und weiteren Gefäß auf gleiche Höhe und damit den osmotischen Vorgang zu Ende bringt. Je dünner die Membran ist, um so schwieriger wird es einer Lösungsmolekel werden, gegen den noch starken Strom des Lösungsmittels einen Halt an dieser zu gewinnen; und Membranen, die nur aus einer Schicht von Molekeln bestünden, würden die Halbdurchlässigkeit am längsten zeigen. Dieser Schluß steht mit den bisherigen Erfahrungen nicht in Widerspruch; er bringt aber die Dicke der Membran und die Dauer der Halbdurchlässigkeit in einen ursächlichen Zusammenhang.

7 Die gegebene naheliegende Erklärung der Halbdurchlässigkeit einer Membran wie auch die feststehende Tatsache der nur zeitweiligen Halbdurchlässigkeit hätten van't Hoff gar nicht dazu führen dürfen, die Membran als Sitz der osmotischen Energie anzusehen. Es scheint, daß ihn die Versuche seines Landsmannes de Vries mit den Protoplasmahäuten lebender Zellen dazu bestimmt haben. Bei einer lebenden Zelle drängt sich die Vorstellung der Auswahl in ihrer Tätigkeit leicht auf, besitzt doch der Organismus alle Einrichtungen zu seiner Erhaltung und Weiterbildung; und es sind seine Äußerungen auf die Einwirkungen von außen meist zweckmäßig, d. h. zu seinem Fortbestehen dienlich. Und diese Wahlfähigkeit kann man versucht sein, auch der Protoplasmahaut zuzuschreiben, die die Zelle mit der Umgebung in Berührung bringt. Aber deshalb darf man diese Wahlfähigkeit gewiß nicht auf Membranen übertragen, in denen nie Leben gewesen oder in denen, wie in der Schweinsblase, das Leben längst abgestorben ist. Außerdem läßt sich auch mit guten Gründen bezweifeln, daß die Protoplasmahaut der lebenden Zelle diese Wahlfähigkeit hat. Zunächst gewährt sie auch Giften, die das Leben der Zelle vernichten, den Durchgang; dann aber läßt sie die Lösungen in die Zellen eintreten oder austreten, je nach den äußeren Umständen. Soll Zucker in die Zelle eintreten, so nimmt sie ihn auf; soll er austreten, so gibt sie ihn ab. Die Protoplasmahaut ist demnach gar nicht halbdurchlässig, wie vielfach angenommen wird; und deshalb kann sie gar nicht als Stütze von van't Hoffs Anschauungen herangezogen werden.

Mir scheint die Aufnahme und Abgabe von Nahrung in einer Zelle allein abhängig zu sein von der Konzentration des das Zellinnere ausfüllenden flüssigen Inhalts im Vergleich zu derjenigen in den Nachbarzellen oder Gefäßen. Hat die Umgebung einen konzentrierteren Inhalt, so dringen von ihr aus in die Zelle auf Grund der Diffusion durch die Poren der Zellhaut Molekeln ein, bis die gleiche Konzentration innen und außen hergestellt ist. Nach dieser Auffassung kann die Zelle über die Konzentration der Lösung in den Nachbarzellen hinaus keine Nahrung aufnehmen. Der Kunstgriff, durch den es gelingt, trotzdem in den Zellen große Nahrungswerte aufzuspreichern, beruht auf der Fähigkeit der Zelle, lösliche Substanzen in unlösliche zu verwandeln und umgekehrt, also Zucker in Stärke, lösliche Fette in unlösliche. Da nun bestimmte Verbindungen, die aus C, O und H bestehen, die Eigenschaft haben, durch kleine chemische Umlagerungen aus dem löslichen Zu-

stand in den unlöslichen überzugehen, so baut sich das Leben der Pflanze auf dieser Fähigkeit auf. Sie reagiert auf die verschiedene Konzentration, die, sozusagen, als erster Reiz wirkt. Der Ausgleich der Konzentration wirkt als neuer Reiz auf die in den Nahrungsstoffen aufgespeicherte Energie, um die besprochene Umwandlung zu bewirken. Und was als Wahlfähigkeit angesehen wird, ist nichts anderes als Notwendigkeit, welche im letzten Grunde abhängt von den allgemeinen physikalischen Bedingungen, unter denen die Pflanze steht, wie Licht, Temperatur, Luft- und Bodenfeuchtigkeit und den Nährsalzen der Erde.

8 Hiermit ist aber der Vorstellung van't Hoffs, daß die Membran als solche der Sitz und die Ursache des osmotischen Druckes sei, jeder Boden entzogen. Ein weiterer Umstand hätte ihn gleichfalls von seiner Annahme abhalten sollen, nämlich sein Gesetz über die Größe des osmotischen Druckes. Wenn dieser nur von der Anzahl der Molekeln fester Substanz in der Volumeinheit abhängig ist, wenn also die verschiedensten Membranen unter sonst gleichen Umständen denselben osmotischen Druck aufweisen, so liegt der Schluß nahe, daß die Beschaffenheit der Membran keinen Einfluß auf den Druck hat und daß die Quelle desselben anderweitig zu suchen ist.

Van't Hoff hat diesen Einwand sicher gefühlt; denn er sucht den Nachweis zu führen, daß dieser Druck auch bei den verschiedensten Membranen trotzdem derselbe sein müsse. Allerdings ist ihm dieser Versuch nicht geglückt, trotz des Anscheins eines besonders hohen wissenschaftlichen Gepräges. Er leitet diesen Beweis mit der Bemerkung ein, daß er in der Thermodynamik begründet und demnach von den Voraussetzungen über den Mechanismus frei sei. Worauf er diese Behauptung stützt, gibt er nicht an. Unmittelbar einleuchtend ist sie auch nicht, wenigstens nicht für mich. Danach bleibt nur übrig, seinen Gedankengang genau zu prüfen. Er sagt: „Es leuchtet ein, wie bei der Annahme der Möglichkeit, daß zwei verschiedene halbdurchlässige Membranen einen verschiedenen osmotischen Druck veranlassen, sich die Möglichkeit eines perpetuum mobile einstellt, indem z. B. in einem Ringe rechts die Lösung, links das Lösungsmittel gedacht wird, oben und unten getrennt von Membranen, welche einen osmotischen Druck P_1 bzw. P_2 veranlassen. Eine etwaige Druckdifferenz P_1—P_2 würde dann eine Strömung herbeiführen, die, da sämtliche Verhältnisse unverändert bleiben, nie zum Stillstand käme."

Sollte sich in diesem Ringe auf Grund der van't Hoffschen Vorstellung ein osmotischer Druck geltend machen, so würde er sich von der Lösung nach dem Lösungsmittel erstrecken; und da das Lösungsmittel von beiden Seiten durch festliegende Membranen begrenzt wäre, so würde es von zwei Seiten gepreßt werden. Dabei würde entweder eine Arbeit geleistet oder keine; im letzteren Falle bliebe alles beim alten. Im ersten Fall kann, da die Membranen halbdurchlässig sind, also die Lösung nicht durchlassen, gar keine Bewegung auftreten, demnach auch keine Arbeit geleistet werden. Es muß Ruhe bleiben, weil die Voraussetzungen des Mechanismus die Bewegung ausschließen, und zwar auch für den Fall, daß die beiden Drucke verschieden sein sollten. Das perpetuum mobile, das van't Hoff folgern will, ist unmöglich; und damit fällt der ganze Beweis. Aber die mit so großer Sicherheit aufgestellte Behauptung, daß ein thermodynamischer Beweis unabhängig von der Kenntnis des Mechanismus geführt werden könne, wird an diesem einen Beispiel als falsch nachgewiesen.

Tritt man aber der Vorstellung, daß die Membran die Ursache der osmotischen Energie sei, näher, so müßte diese doch in ihr aufgespeichert sein, selbst wenn sie nur aus einer einzigen Schicht von Zellen bestehen sollte.

Sie muß dort dauernd vorhanden sein, wenn sie auch nur unter bestimmten Umständen zur Auslösung kommt, wie man sich etwa die Energie in Holz angesammelt denkt, die erst durch Erwärmung an e i n e r Stelle dazu kommt, allmählich im ganzen Stück frei zu werden. Aber die so vorhandene Energie muß doch einmal erschöpft werden; dann müßte doch die ganze Membran versagen. Wenn sie das aber nicht tut, muß sie einen unendlichen Vorrat enthalten, was wieder nicht denkbar ist. Auch die im Radium aufgespeicherte Energie geht einmal zu Ende. Will aber van't Hoff diese Ansicht nicht gelten lassen, dagegen annehmen, daß bei jedem neuen osmotischen Versuch die erforderliche Energie in der Membran von selbst auftrete, dann würde er eine Erzeugung von Energie aus nichts annehmen, also auch ein perpetuum mobile voraussetzen, dessen Unmöglichkeit gerade seinen Beweis zwingend machen sollte.

9 Nun hat van't Hoff als weitere Stütze für seine Anschauung die interessanten Versuche von W. Ramsay angeführt, die dieser mit dem Austausch der Gase Wasserstoff und Stickstoff durch erwärmte Palladiumplatten gemacht hat. Um zu zeigen, daß auch diese nicht geeignet sind, van't Hoff als Stütze zu dienen, sollen sie hier kurz besprochen werden.

Palladium hat die Eigenschaft, bei gewöhnlicher Temperatur Wasserstoff auf sich zu verdichten. Erwärmt man eine Palladiumplatte bis auf 235 ° C, so beginnt sie, wenn auch langsam, Wasserstoff durch sich hindurchzulassen; und bei 280 ° und noch mehr bei 335 ° C geht das Gas leicht hindurch. Stickstoff dagegen verdichtet sich nicht auf Palladium und dringt auch nicht hindurch, selbst nicht bei Temperaturen von 600 ° C. Ramsay trennte nun zwei geschlossene Räume A und B durch eine Palladiumwand, füllte A mit reinem Wasserstoff, B mit reinem Stickstoff, beide zunächst unter Atmosphärendruck, erwärmte A und die Palladiumplatte auf 280 ° bzw. 335 ° und maß die Druckzunahme in dem Gefäß B. Er fand dort seiner Erwartung gemäß eine starke Druckzunahme; aber wider seine Erwartung blieb der Partialdruck des Wasserstoffs in B hinter dem Drucke in A zurück. Diese Abweichung konnte nicht auf Versuchsfehler zurückgeführt werden, da sie einerseits immer nach derselben Seite lag und anderseits immer dieselbe Größe ausmachte. So betrug sie, wenn als Gase reiner Wasserstoff und reiner Stickstoff in Frage kam, sowohl bei 280 ° wie bei 335 ° zehn Prozent. Ramsay suchte diese Abweichung zu erklären, vermutet sie in einer chemischen Einwirkung des Wasserstoffs auf Palladium, wenn Wasserstoff in den Atomzustand übergeht, findet jedoch in seinem Erklärungsversuch keine eigene Befriedigung.

Nun läßt sich aber eine annehmbare Erklärung geben. Da Wasserstoff bei gewöhnlicher Temperatur durch Adhäsion von Palladium festgehalten wird, Stickstoff dagegen nicht, so liegt es nahe, zu vermuten, daß die Adhäsion auf die Druckverminderung Einfluß hat. Wenn nun auch von der Adhäsion noch keine klare Vorstellung gewonnen ist, so wird doch so viel ohne Widerspruch zugegeben werden, daß eine unter dem Einfluß der Adhäsion stehende Gasmolekel nicht die Beweglichkeit der freien hat, daß also die Adhäsion wie ein Bewegungshindernis oder wie eine Verminderung der kinetischen Energie der Molekel wirkt. Diese Verminderung ist die Grundbedingung für das Anhaften an der festen Wand. Dabei ist es durchaus nicht erforderlich, daß immer dieselben Gasteilchen unverändert an der Wand haften bleiben; vielmehr ist die Vorstellung nicht abzuweisen, daß ein ständiger Wechsel zwischen den anhaftenden und den frei beweglichen Gasmolekeln stattfindet, schon aus dem einfachen Grunde, daß die Geschwindigkeit der einzelnen Gasmolekel zu verschiedenen Zeiten verschieden groß ist, so daß sie, mit

großer Geschwindigkeit versehen, sich loslösen und, mit kleiner ausgestattet, sich anlegen kann, wenn sie frei war. Der Gleichgewichtszustand tritt ein, wenn die sich ablösenden Molekeln den sich anlagernden gleichkommen.

Wenn nun auf der B-Seite der Platte der Wasserstoff geringeren Partialdruck hat als auf der A-Seite, also in der Volumeinheit weniger Molekeln enthält als auf der anderen Seite, so ist daraus zu schließen, daß die auf der B-Seite anhaftenden Molekeln sich weniger leicht loslösen; und da die Dichte der adhärierenden Schicht mit der Adhäsion in gradem Verhältnis steht, so ist anzunehmen, daß die Wasserstoffschicht auf der B-Seite dichter als auf der A-Seite ist. Es bleibt übrig, diese zu erklären. Nun unterscheidet sich aber die Schicht auf der B-Seite von der auf der A-Seite dadurch, daß die Molekeln durch die Palladiumwand hindurchgewandert sind. Man muß daher annehmen, daß sie auf dieser Wanderung die dichtere Lagerung angenommen haben. Um sich klar zu machen, wie dies erreicht werden kann, muß man die Frage beantworten, weshalb sich Wasserstoff an Palladium anlagert, während dies Stickstoff und die anderen Gase nicht tun. Haben die Atome und demnach auch die Molekeln zweier Elemente, wenn nicht gleiche, so doch ähnliche, also harmonische Wärmeschwingungen, so halten sie ihre Nachbarlage viel leichter längere Zeit bei, als wenn ihre beiderseitigen Schwingungen anharmonisch sind. Denn die Veranlassung zur Trennung beruht darauf, daß benachbarte Molekeln entgegengesetzte Bewegungsrichtungen erhalten. Daß die Schwingungen der Wasserstoffatome in den Molekeln mit denen der Metalle in größerer Übereinstimmung stehen, ist aus dem Metallcharakter des Wasserstoffs zu vermuten. Die Ersetzung des Wasserstoffs durch Metalle bei der Bildung von Salzen aus Säuren, ohne daß der Bestand der Verbindung erschüttert wird, deutet auf diese Eigentümlichkeit hin. Während die auf der A-Seite anfliegenden und sich anlagernden Wasserstoffmolekeln aus den verschiedensten Richtungen kommen und daher nicht so leicht eine für alle Molekeln mit den Palladiumatomen gleichgerichtete Schwingung erhalten können, kommen sie auf der B-Seite in geordneter Lage an, da die von ihnen durchwanderten, stark erwärmten und daher synchron zueinander schwingenden Palladiumatome ihnen die eigene Schwingungsbewegung aufgezwungen haben, und lagern sich dort in möglichst gleicher Ordnung übereinander und demgemäß in größerer Dichte. Die Adhäsion ist also größer, die Loslösung unter sonst gleichen Bedingungen ungünstiger; der Partialdruck des Wasserstoffs wird geringer.

Die gegebene Erklärung wird im großen und ganzen den Ramsayschen Versuchen gerecht; doch ist sie nicht imstande, jede Besonderheit der zahlenmäßigen Ergebnisse zu deuten. Aber die Versuche sind auch nur in kleinem Umfange gemacht; und die Ergebnisse zeigen, daß sie noch mit einem nicht unerheblichen Unsicherheitsfaktor behaftet sind. Daher liegt der Wunsch nahe, sie zu wiederholen und zu erweitern. Dabei dürfte die Aufmerksamkeit auch mit auf die Frage zu richten sein, wie groß sich der Partialdruck des Wasserstoffs auf der B-Seite nach der Abkühlung erweist, ob er während derselben konstant bleibt oder etwa zunimmt.

10 Wie stellt sich nun van't Hoff zu den Ramsayschen Ergebnissen? Er verschweigt einfach die von Ramsay festgestellte geringere Größe des Partialdrucks von Wasserstoff auf der B-Seite, er verschweigt auch, daß diese nicht auf Versuchsfehler zurückzuführen ist, und gibt nur zu, daß der Partialdruck auf der B-Seite dem auf der A-Seite nicht genau, sondern nur angenähert gleich sei. Als wissenschaftlich ernster Forscher durfte er aber gar nicht so verfahren; er mußte, zumal bei einem Vorgange, den er zur Erklärung eines anderen heranzog, die Versuchsergebnisse genau mitteilen,

und wenn er sie nicht für richtig ansah, seine Gründe dafür geltend machen. So erweckte er im Leser die falsche Vorstellung, daß Ramsays Ergebnisse zwar nicht die genaue Gleichheit zweier Drucke ergaben, daß aber die Abweichungen zu unbedeutend seien, um die Gleichheit in Frage zu stellen, und er erschleicht dadurch einen Schluß, den er ganz nicht ziehen durfte.

Ja, wenn die Vorgänge der Gase in bezug auf die Palladiumplatte denen von Lösung und Lösungsmittel in bezug auf die trennende Membran gleichzusetzen sein sollten, so hätte er zu dem entgegengesetzten Schlusse kommen sollen als wie er gelangt ist. Er hätte so folgern müssen: Wasserstoff verdichtet sich auf Palladium und dringt bei hinreichender Erwärmung durch das Metall hindurch. Stickstoff tut weder das eine noch das andere. Der Partialdruck des Wasserstoffs ist auf beiden Seiten der Palladiumwand verschieden: man kann vermuten, daß die Wand eine wesentliche Rolle spielt. Sollen sich nun die Osmose und der Ramsaysche Diffusionsvorgang entsprechen, so muß untersucht werden, ob der osmotische Druck auf der einen Seite der Membran und der Druck der in der Lösung aufgelösten festen Partikeln anderseits verschieden oder gleich sind. Sind sie verschieden, so darf man die trennende Membran dafür in Anspruch nehmen; sind sie gleich, so hat sie auf die Vorgänge keinen Einfluß. Da aber beide Drucke nach dem van't Hoffschen Gesetze gleich sind, so ist die Membran weder Sitz noch Quelle noch Ursache des Druckes.

11 Es erübrigt sich, auf van't Hoffs weitere, durch besondere Klarheit nicht ausgezeichnete Darlegungen über die Osmose einzugehen. Jedenfalls genügt das Gesagte, um seine Anschauungen als nicht befriedigend hinzustellen. Es ist daher begreiflich, daß noch andere Vorstellungen entwickelt worden sind. Zunächst ist die reichlich naive Vorstellung Ostwalds zu erwähnen, der den Überdruck des Lösungsmittels gegenüber der Lösung, den er richtig erkennt, auf einen Zug der in letzterer gelösten festen Substanzen auf die Molekeln des Lösungsmittels zurückführen wollte. Dem ist entgegenzuhalten, daß jeder Zug an das Vorhandensein eines festen Körpers gebunden ist, auf den ein Druck ausgeübt wird. Da sich ein solcher weder in der Lösung noch in dem Lösungsmittel vorfindet, so ist diese „Erklärung" hier eine Verdunkelung, also nichts als eine Verlegenheitsannahme.

Eine mehr zu beachtende Erklärung ist die folgende. Sie setzt ein Gefäß voraus, das durch eine vertikal stehende Membran in zwei Hälften geteilt ist, von denen die eine, etwa ein Liter, die Lösung, die andere das Lösungsmittel Wasser enthält. Die Membran ist halbdurchlässig im absoluten Sinn wie bei Pfeffer und van't Hoff. Das Molekulargewicht von Wasser ist 18; und man nennt die Menge Molekeln, welche in 18 g Wasser enthalten sind, 1 Mol Wasser. Demnach enthält ein Liter Wasser 55,56 oder abgerundet 56 Mol. Das Molekulargewicht des Rohrzuckers ist 342, demnach wiegt ein Mol Zucker 342 g. Beide Mol enthalten dieselbe Anzahl von Molekeln. Ersetzt man nun in einem Liter Wasser des Gefäßes 1 Mol Wasser durch 1 Mol Zucker, so enthält die Lösung wieder 56 Mol. Die 56 Mol Wasser auf der einen Seite der Membran stoßen gegen diese und auf der anderen Seite 55 Mol Wasser und 1 Mol Zucker. Wenn man von dem einen Mol Zucker absieht, so rufen die 56 Mol Wasser auf der Lösungsmittelseite einen Überdruck auf die Membran im Vergleich zu den 55 Mol auf der Lösungsseite hervor. Dieser Überdruck soll der osmotische sein. Dies würde aber nur richtig sein, wenn das Mol Zucker keine kinetische Energie enthielte und demnach keine Stöße auf die Membran ausüben könnte. Nun hat aber jede Molekel des gelösten Zuckers dieselbe mittlere kinetische Energie wie eine Wassermolekel bei der derselben Temperatur, da sonst in der Lösung kein Energiegleich-

gewicht bestehen könnte. Daher muß das Mol Zucker ebenso stark drücken wie ein Mol Wasser; dann ist aber auf keiner Seite ein Überdruck vorhanden und ein osmotischer Druck ist unmöglich.

Berücksichtigt man die Volumänderung bei Auflösung von Zucker in Wasser, so würde diese Erklärung fordern, daß die Zuckerlösung noch Wasser nach der anderen Seite hinüberdrängte, was jeder Erfahrung widerspricht. Löst man nämlich in 1 Liter Wasser 342 g Zucker auf, so nimmt die Lösung einen Raum von 1006 ccm ein und enthält 57 Mol, während 1 Liter Wasser 56 Mol enthält. Ein ccm Zuckerlösung enthält also 57 : 1006, ein ccm Wasser 56 : 1000 Mol. Da der erste Bruch größer als der zweite ist, muß ein ccm Zuckerlösung stärker drücken als 1 ccm Wasser, muß also noch Wasser zu dem anderen Wasser hinüberdrücken, da ja Zucker wegen der Halbdurchlässigkeit der Membran nicht durch ihre Maschen hindurchgehen soll.

Also auch diese Erklärung steht mit den Tatsachen in Widerspruch und muß demnach zurückgewiesen werden. Aber sie enthält den einen prinzipiellen Fortschritt, daß der Sitz des osmotischen Druckes nicht mehr in die gelöste Substanz gelegt wird, sondern der Druck in der Wirkung von Lösung und Lösungsmittel aufeinander gesucht wird.

12 Nach dieser gesamten, etwas langwierigen Besprechung der früheren Erklärungsversuche ergibt sich ohne Mühe ein gangbarer neuer. Der osmotische Druck muß in einem Überdruck des Lösungsmittels über den Druck der Lösung bestehen. Es ist eine Wiederholung des Gedankenganges von Torricelli, der ihn dazu führte, das Aufsteigen des Wassers unter dem Pumpenkolben zu erklären. Er verwarf die allzu menschliche Vorstellung des Horror vacui mit seinem Sitz unterhalb des Pumpenkolbens und führte dafür den Druck der äußeren Luft ein, die auf die Oberfläche des Wassers und durch Übertragung auf die untere Seite des Kolbens wirkte. Ebenso kann der osmotische Druck van't Hoffs, dem durch das Hineinziehen der Halbdurchlässigkeit eine Art Willenstätigkeit anhaftet, durch einen Überdruck des Lösungsmittels über die Lösung ersetzt werden. Beide Flüssigkeiten wirken druckerzeugend durch die kinetische Energie ihrer Molekeln. Wenn nun das Lösungsmittel einen Überdruck erzeugen soll, so muß die gelöste Substanz in der Lösung auf deren Druck hemmend einwirken, also eine Verringerung der kinetischen Energie der Molekeln der Lösung verursachen.

Die hemmende Wirkung zeigt sich auch bei der Dampfdruckverminderung, der Erhöhung des Siedepunktes und der Erniedrigung des Gefrierpunktes, wenn in dem Lösungsmittel eine feste Substanz aufgelöst wird. Die neue Vorstellung bringt daher alle vier Erscheinungen, die ihrer Wirkung nach schon lange zusammengeordnet sind, auch ihrer Ursache nach unter denselben Gesichtspunkt, während van't Hoff in der Auflösung des festen Stoffes nicht die Hemmung einer Wirkung, sondern in dem gelösten Stoffe die direkte Ursache der Erscheinung findet. Sie muß daher auch imstande sein, alle vier Erscheinungen zu erklären; und danach ist sie auszuwählen.

Die hemmende Wirkung, die durch den aufgelösten Stoff im Lösungsmittel entsteht, kann entweder dadurch hervorgerufen werden, daß jede einzelne Molekel der Lösung eine Einbuße an lebendiger Kraft erleidet oder daß die durchschnittliche kinetische Energie jeder Molekel dieselbe bleibt, aber die Anzahl der Molekeln sich vermindert. Da aber diese Wirkung nach van't Hoffs Gesetz der Anzahl der gelösten Molekeln des festen Stoffes proportional ist, so würde die erste Annahme voraussetzen, daß mit jeder Auflösung *einer* Molekel der festen Substanz auch sprungweise eine Abnahme der durchschnittlichen Energie aller Molekeln verbunden wäre. Dies ist aber

wegen der inneren Unwahrscheinlichkeit abzulehnen, wenigstens so lange, als die zweite Annahme Aussicht auf Erfolg bietet. Dafür führt diese letztere sofort zum van't Hoffschen Gesetz, wenn die Anzahl der verschwindenden Molekeln des Lösungsmittels in der Lösung genau so groß ist wie die Anzahl der in der Lösung isolierten Molekeln des festen Stoffes.

Bevor der gelöste Stoff in das Lösungsmittel auf der einen Seite der Membran gebracht wird, gleichen sich die Stöße der Molekeln der Flüssigkeiten auf beiden Seiten aus. Wenn nun durch das Hinzufügen des festen Stoffes eine Verminderung der frei schwingenden Molekeln eintreten soll, so müssen die hinzutretenden Molekeln des festen Stoffes so wirken, daß sie zunächst keine Vermehrung der kinetischen Energie bringen und außerdem noch die Anzahl der Molekeln der Lösung um ihre eigene Anzahl vermindern. Damit die Molekeln des festen Stoffes keine Vermehrung der kinetischen Energie bringen, dürfen sie ihre Selbständigkeit nicht behalten, sondern müssen sie durch Anlehnung an die Molekeln des Lösungsmittels aufgeben. Stellt man sich nun vor, daß sich eine Molekel des festen Stoffes an eine Molekel Lösungsmittel anlegt, so bleibt die Anzahl der Molekeln des Lösungsmittels noch dieselbe wie vorher, auch in der Volumeinheit, wenn man von der Volumvermehrung durch die gelöste Substanz absieht, die hier vernachlässigt werden soll. Also bleibt auch die kinetische Energie der Lösung dieselbe. Um die Verminderung zu erhalten, die das van't Hoffsche Gesetz verlangt, muß angenommen werden, daß jede Molekel gelöster fester Substanz sich an zwei Molekeln Lösungsmittel anlegt und dadurch Molekelkomplexe oder Großmolekeln bildet.

Geht man auf die schon besprochene Zuckerlösung zurück, die durch Auflösung von 342 g Zucker in 1 Liter Wasser gewonnen wird, so enthält 1 Liter Wasser 56 Mol, 1 Liter Zuckerlösung, genau 1006 ccm 56 Mol Wasser und 1 Mol Zucker. Vereinigt sich jede Zuckermolekel mit zwei Molekeln Wasser, so sind 54 Mol Wasser und 1 Mol Zuckerlösung vorhanden. Auf die trennende Membran wirkt von der einen Seite der Druck von 56 Mol Wasser und auf der anderen Seite der Druck von 54 Mol Wasser und 1 Mol Zuckerlösung. Dann wird auf der Seite des reinen Lösungsmittels ein Überdruck wirksam, der von 1 Mol Wasser herrührt. Dieser Druck ist nach dem empirisch festgestellten van't Hoffschen Gesetze gleich dem Drucke eines Gases, welches mit gleicher Molekelzahl, also mit 1 Mol, das gleiche Volum, also in diesem Fall 1 Liter ausfüllt. Dabei ist es ganz gleichgültig, welcher Art das Gas ist. Es kann auch Wasserdampf sein. Das heißt aber: 1 Mol Wasserüberdruck auf der Seite des Lösungsmittels drückt ebenso stark wie 1 Mol Wasserdampf. Da aber das Mol Wasser des Überdrucks genau so viele Molekeln enthält wie das Mol Wasserdampf, so sagt dies nichts anderes aus als die bekannte Tatsache, daß eine Molekel Wasser — unter gleichen Bedingungen — denselben Druck ausübt wie eine Molekel Wasserdampf. Das van't Hoffsche Gesetz ist also eine unmittelbare Folge der vorgetragenen Anschauung.

Als ich zuerst zu dem Schlusse kam, van't Hoffs Gesetz könne durch die Bildung von Großmolekeln verständlich gemacht werden, schreckte ich vor demselben zurück und glaubte, ihn ablehnen zu müssen, als zu gewagt. Aber seine große Einfachheit und seine Tragweite für das Verständnis der elektrischen Vorgänge hat mich mehr und mehr bestimmt, ihn aufrecht zu halten und ihm immer größere Bedeutung beizumessen. Mir waren die Betrachtungen anderer Forscher über Molekelkomplexe unbekannt; erst als ich meine Arbeit über die Osmose abgeschlossen hatte, habe ich von ihnen Kenntnis erhalten. Was ich nachträglich darüber gelesen habe, hat mir in-

soweit Genugtuung bereitet, als ich erkannte, daß meine Ansichten auf dem Wege der wissenschaftlichen Entwicklung lagen; inhaltlich haben mir dieselben nichts geboten, was mich fördern konnte.

13 Es fragt sich nun, welche unmittelbaren Folgerungen man aus der neuen Vorstellung ziehen kann. Zunächst ist zu schließen, daß diese Großmolekel eine Flüssigkeitsmolekel im gewöhnlichen Sinne des Wortes ist, daß die Lösung nicht ein Gemenge von flüssigen und festen Molekeln ist, sondern nur aus flüssigen Partikeln besteht. Die bisherige Vorstellung war in diesem Punkte ganz unbestimmt. Ferner gilt das van't Hoffsche Gesetz nur dann, wenn sich zwei Wassermolekeln mit einer Kernmolekel vereinigen. Sollte sich nur e i n e Wassermolekel mit dieser verbinden, so kann kein Überdruck auf der einen Seite der Membran, also auch kein osmotischer Druck auftreten. Verbindet sich dagegen eine Kernmolekel mit n Wassermolekeln, so fallen je (n—1) Wassermolekeln auf 1 Kernmolekel aus; also muß auf der anderen Seite ein osmotischer Druck von (n—1)facher Stärke auftreten. Dann kann das van't Hoffsche Gesetz nicht allgemein gelten; und da dies auch nicht der Fall ist, indem es z. B. für in Ionen zerspaltbare Salze abgeändert werden muß, so muß man diese Abänderung auf eine andere Anlagerung von Wassermolekeln zurückführen.

Vor allem aber ist die Folgerung zu ziehen, daß der osmotische Druck nur so weit zur Wirkung kommt, als Großmolekeln gebildet werden und als der dadurch auf der Seite des Lösungsmittels hervorgerufene Überdruck nicht durch Diffusion ausgeglichen wird. Dann hängt die Bildung des Druckes von so viel Voraussetzungen ab, daß er nur in beschränktem Maße zur Entstehung kommt. Es sind zunächst zwei Flüssigkeiten erforderlich, ein Lösungsmittel und die Lösung eines festen Stoffes in diesem Lösungsmittel. Die Lösung muß noch nicht aufgelöste Teile des festen Stoffes enthalten, da nur aus ihnen Großmolekeln gebildet werden können. Ferner müssen beide Flüssigkeiten durch eine Membran getrennt werden, deren Maschen weit genug sind, um beide Flüssigkeiten durchzulassen, aber auch hinreichend eng, um einen sofortigen Austausch der verschieden schweren Flüssigkeitsteilchen unter dem Einflusse der Gravitation zu verhindern. Denn sonst würden beide Flüssigkeiten sich sofort mischen und einen Überdruck auf der einen Seite unmöglich machen. Damit ist die alleinige Bedeutung der Membran festgelegt. Dann muß schließlich die Anordnung getroffen sein, daß der Überdruck sich in einer solchen Richtung geltend macht, daß durch ihn eine sichtbare Arbeitsleistung entsteht. Diese Bedingungen können bei einem Versuch zusammen ohne Schwierigkeiten erfüllt werden. Aber daß sie sich in der freien Natur leicht von selbst zu der Erscheinung zusammenfinden, ist nicht als sehr wahrscheinlich anzusehen. Es ist daher ein verfehltes Streben, auf den osmotischen Druck überall in der Natur anzutreffende Naturerscheinungen wie die elektrischen zurückzuführen, da bei diesen in den seltensten Fällen die Gesamtheit der aufgestellten Bedingungen als erfüllt nachgewiesen werden kann. Dagegen kann die Bildung der Großmolekeln überall zutage treten, wo Lösungsmittel mit in ihnen auflösbaren festen Stoffen zusammenstoßen. Man kann daher versuchen, auf deren Bildung die Quelle bestimmter elektrischer Energien zurückzuführen.

Wie weit aber die vorgetragene Anschauung von der bisher geltenden abweicht, mag der triumphierende Ausspruch Ostwalds in einer Versammlung der Ingenieure Deutschlands bezeugen, daß in einer Flasche mit konzentrierter Ammoniaklösung ein osmotischer Druck von vielen Atmosphären enthalten sei, wenn er auch nicht immer zur Geltung komme. Ein solcher

Druck ist in der Flasche gar nicht vorhanden, wie eine nüchterne Betrachtungsweise es für selbstverständlich hält, weil die kleine Flasche mit Ammoniaklösung gar nicht die Wassermenge enthält, die zur Bildung der Großmolekeln erforderlich ist und weil außerdem die Membran fehlt, die das Lösungsmittel o h n e Großmolekeln von der Lösung m i t Großmolekeln trennt. Man kann also jetzt die Flasche mit Ammoniak wieder ohne Lebensgefahr in die Hand nehmen.

14 Es bleibt nun noch der Versuch übrig, eine genauere Vorstellung zu gewinnen von einer Großmolekel, von dem Zusammenhang der in ihr vereinigten Molekeln und wie sich dieser Zusammenhang bildet. Dabei ist von der Clausiusschen Vorstellung auszugehen, daß die Flüssigkeiten wie die Gase fortschreitende, schwingende, wälzende Bewegungen durcheinander ausführen und aus jedem Zusammenstoße neue Geschwindigkeiten nach Größe und Richtung erhalten. Bei dem dichteren Zusammenlagern der Molekeln im flüssigen Zustande sind die Wege bei derselben Geschwindigkeit kürzer als im gasförmigen. Es wird daher viel häufiger vorkommen, daß zwei Molekeln nebeneinander bestimmte Richtungen der Bewegung haben, z. B. beide nebeneinander dieselbe oder die grade entgegengesetzte. Sie können in diesen Fällen eine Molekel des festen Stoffes, die auf seiner Oberfläche sitzt, direkt treffen. Häufiger wird es eintreten, daß sie an den beiden Seiten derselben vorbeifahren, auf andere Molekeln stoßen und an der Festmolekel wieder vorbeifliegen. Aber ebenso kann es kommen, daß die eine der gleichgerichteten Molekeln der anderen vorauseilt und schon in der Rückwärtsbewegung begriffen ist, wenn die zweite die Hinbewegung noch nicht vollendet hat. Die Festmolekel ist auch nicht in Ruhe, sondern in Schwingung oder Drehung befindlich. Dreht sie sich um ihren Massenmittelpunkt, so wird ihre Drehungsrichtung mit der Richtung der an ihr vorbeifahrenden Wassermolekeln mehr oder minder zusammenfallen. Dabei sind die beiden Fälle besonders hervorzuheben, daß die Bewegungsrichtungen der Festmolekel mit denen der Wassermolekeln fast zusammenfallen oder fast vollständig entgegengesetzt gerichtet sind. Im letzteren Falle werden sie bei einem etwa erfolgenden Zusammenstoße schnell wieder auseinandergetrieben; im ersteren Falle bleiben sie in naher Zusammenlagerung. Durch die nachfolgenden von außen kommenden Stöße werden die gleichgerichtet sich bewegenden Molekeln noch mehr einander genähert und gezwungen, sich um die Festmolekel kreisend zu bewegen; und da ihre Kreisbahn kleiner wird, muß die Winkelgeschwindigkeit größer werden. So dreht sich das Paar Wassermolekeln um die Festmolekel in einer Tangentialebene zum festen Körper. Indem die anprallenden Molekeln der Nachbarschaft die beiden Wassermolekeln gegen den Kern stoßen, wird deren Geschwindigkeit auf ihn zum Teil übertragen. Das ganze Gebilde erhält die gleiche Winkelgeschwindigkeit, ist demnach wie e i n e Einzelmolekel anzusehen, aber wie eine Einzelmolekel, die die kinetische Energie von drei ursprünglichen Einzelmolekeln enthält. Diese Molekel wird hier als Großmolekel bezeichnet. Die zugeführte Energie zweier Wassermolekeln bewirkt die Trennung der Großmolekel von dem festen Stoff, so daß sie sich in der Lösung wie jede Wassermolekel bewegt. Sie muß die sogenannte „Kohäsion" überwinden, die die Molekeln des festen Stoffes aneinanderkettet. Ist sie nicht groß genug für diese Aufgabe, dann ist die Lösung des festen Körpers in Wasser nicht möglich. Allerdings kann man durch Wärmezufuhr die Kohäsion vermindern und erreicht es auch dadurch, feste Körper zu lösen, die bei normaler Temperatur nicht löslich sind.

Anderseits ist es nicht notwenndig, daß die ganze kinetische Energie der

beiden Wassermolekeln zur Loslösung der Großmolekel aufgewendet werden muß. Dann bleibt ein Überschuß frei, der für andere Zwecke verwendbar ist. Auf Grund dieser Tatsache könnte jemand gegen meine ganze Vorstellung den Einwand erheben, daß das Vorhandensein dieses Überschusses bewirken könne oder müsse, daß das van't Hoffsche Gesetz nicht gültig bliebe, indem mehr Großmolekeln gebildet würden, als dies Gesetz zulasse, und daß, wenn dies nicht der Fall wäre, diese überschüssige Energie nachgewiesen werden müsse. Auf den ersten Punkt ist zu bemerken, daß meine Erklärung grade das van't Hoffsche Gesetz verständlich macht, in dem immer zwei Wassermolekeln sich mit einer Festmolekel verbinden. Es müßte daher der Einwendende aus meiner Vorstellung heraus nachweisen, auf welchem Wege die überschüssige Energie noch andere Großmolekeln bilden kann. Berechtigter ist die Forderung des Nachweises des Energieüberschusses, der sich letzten Endes immer als Wärme erweisen muß. Ein solcher Nachweis ist meines Wissens noch nicht versucht worden, verdient jedoch die Aufmerksamkeit. Aus einer exakten Feststellung würde man auch ein Maß der „Kohäsion“ gewinnen können. Aber in bezug auf diesen Nachweis muß auf eine Schwierigkeit hingewiesen werden. Nach der vorliegenden Auffassung ist die überschießende Energie Rotationsenergie der Wassermolekeln mit und um den Großmolekelkern; aber diese vergrößert damit die Stoßkraft der Gesamtmolekel nicht, die als Druck beobachtet wird. Denn dieser Druck wird unmittelbar nur von der Energie der translatorischen Bewegung bewirkt. Auch bei der Berechnung des Gasdruckes berücksichtigt man nur die translatorische Bewegung. Es darf daher der Druck der Lösung in einem Liter genau um den Druck von ein Mol Wasser geringer sein als der eines Liters reinen Wassers, wenn auch die kinetische Energie der Lösung nicht genau um die von ein Mol Wasser geschwächt ist. Der Überschuß ist als rotatorische Energie aufgespeichert. Diese wird allerdings allmählich infolge der Zusammenstöße mit anderen Molekeln in translatorische umgesetzt und tritt als Wärme auf; aber während des kurzen Versuches macht sie sich nicht geltend.

Neben der Bildung von Großmolekeln wird auch eine Zerstörung einhergehen. Denn da die Geschwindigkeiten der Gas- und Wassermolekeln zwischen den Grenzen o und ∞ schwanken, so wird es immer die eine oder die andere Großmolekel geben, deren Energievorrat augenblicklich so groß ist, daß die drei Bestandteile auseinanderfallen, indem jeder die zu seiner eigenen selbsttätigen Bewegung erforderliche Geschwindigkeit erhält. Aber diese Fälle sind Ausnahmen, an Zahl sehr klein im Vergleich zu der Zahl derjenigen, die die Bildung begünstigen. Viel häufiger wird es sich ereignen, daß e i n e Wassermolekel durch Stoß von außen abgetrennt wird, so daß ein Gebilde von nur zwei Molekeln bleibt. Aber dieses weist dann im Augenblick einen Energiemangel auf, der durch die Anlagerung einer anderen Wassermolekel wieder ausgeglichen wird, so daß die alte Großmolekel wieder hergestellt ist.

Gegen diese Auffassung der Entstehung der Großmolekeln kann man den Einwand erheben, daß die Bedingungen für die Bildung zu ungünstig sind, um eine einigermaßen große Anzahl verständlich zu machen. Aber die Zusammenstöße erfolgen im Verlauf einer sehr kurzen Zeit, so daß, wenn auch innerhalb dieser Zeit nur an wenigen Punkten sich Großmolekeln bilden, doch innerhalb der Zeit einer Sekunde erhebliche Mengen entstehen können. Die Menge der sich wieder spaltenden Großmolekeln hängt von der Menge der vorhandenen ab, steigt also im Laufe der Zeit mit der Bildung neuer Großmolekeln. Von diesen muß daher schon eine recht erheb-

liche Zahl vorhanden sein, wenn zwischen Bildung und Zerfall Gleichgewicht bestehen soll. Es wird daher auch eine erhebliche Zeit verstreichen, bis dieser Gleichgewichtszustand erreicht wird.

15 Um an einem Beispiele zu zeigen, wie sehr die Erklärung von Naturerscheinungen durch Großmolekeln den bisherigen Versuchen überlegen ist, mag hier das Aufsteigen des Saftes in Bäumen erörtert werden. Vor 60 Jahren suchte man dasselbe unter Führung von Sachs durch Imbibition verständlich zu machen. Taucht man Holz in Wasser, so saugt es sich mit diesem voll und quillt dabei auf; und wird ein trockener Holzkeil in ein Mauerwerk getrieben, und läßt man ihn dann mit Wasser vollsaugen, so vermag er das Mauerwerk auseinanderzusprengen. Er muß also in seinem gequollenen Zustande einen sehr starken Druck ausüben. Diesem Drucke glaubte man das Hinaufsteigen des Bodenwassers von der Wurzel des Baumes bis zur höchsten Spitze zuschreiben zu dürfen. Aber eine befriedigende Vorstellung, wie dieser Druck zustande komme, hat man nicht gefunden. Der Druck des Wassers im Holzkeil beruht auf der Quellungsfähigkeit des Holzes für Wasser, womit ein Volumzuwachs des Holzes verknüpft ist. Aber welche Energie diese Quellung und die durch sie veranlaßte Arbeit bewirkt, darüber sind kaum Vermutungen laut geworden. Es ist denkbar, daß sie auf eine Art von Großmolekelbildung zwischen Holz und Wasser zurückzuführen ist. Daß das Wasser im Holze bleibt und nicht wieder hinausgepreßt wird durch den Widerstand des umgebenden Steines, zeigt, daß es am Holze sehr fest haftet. Daher war aber grade zu erwarten, daß es im Holze bleibt und nicht von der Wurzel bis zur Spitze hindurchwandert. Dann muß aber der emportreibende Druck in der Wurzel am schwächsten wirken, ja bei hohen Bäumen bis auf Null herabsinken, da er dort die ganze Wassersäule bis zur Spitze zu tragen hat.

Man hat dann diese Vorstellung aufgegeben und sich auf den osmotischen Druck als Ursache geeinigt, was um so leichter war, als man von diesem keine Vorstellung hatte. Die Großmolekeln gestatten nun, eine einfache Vorstellung zu gewinnen. Ihr zufolge ist der verursachende Druck in dem Überdruck der dünnen Nährzalzlösung der Wurzel über die konzentrierte Lösung in den darüber liegenden Schichten der Gefäßbündel zu suchen. Dies setzt voraus, daß die Lösung von Gefäß zu Gefäß konzentrierter wird, was den Blättern zu verdanken ist, deren Wasserverdunstung die aufsteigende Nährsalzlösung immer gehaltreicher macht. Zweckdienlich wird eine physikalische Untersuchung sein, die den Nachweis der Konzentrationssteigerung liefert. Von einer Seite ist darauf hingewiesen worden, daß diese Untersuchung überflüssig sei, da feststehe, daß die Zellen am Fuße des Baumes dieselbe Konzentration der Zellflüssigkeit haben, und daß demnach meine Ansicht von Anfang an zurückzuweisen sei. Aber das Aufsteigen des Saftes geht im allgemeinen nicht von Zelle zu Zelle, sondern durch die abgestorbenen Zellkomplexe der Gefäße und folgt hier rein physikalischen Gesetzen, insoweit als lebendes Protoplasma nicht mitwirkt. Es müssen daher die Gefäße untersucht werden und nicht die Zellen. Ferner ist zu bemerken, daß die Konzentration des Zellsaftes nicht gleich der der Gefäße sein kann, da die letztere im allgemeinen an derselben Stelle immer dieselbe Stärke haben wird, die erste aber je nach der augenblicklichen Arbeitsaufgabe der Zelle bald größere, bald geringere Stärke der einzelnen Nährsalzlösungen haben muß. Hat die Zelle die von der Wurzel herbeigeschafften Nährsalze oder die in den Blättern erzeugten Nahrungsmittel aufzunehmen, so muß ihr Zellsaft geringere Lösungsdichte haben als der Inhalt der Gefäße, weil nur unter dieser Bedingung die Nährsalze von selbst in die Zelle treten.

Will sie dagegen aufgespeicherte Nahrung nach anderen Zellen liefern, so muß diese Nahrungslösung konzentrierter als der Saft in den Gefäßen sein. Mit dieser Ansicht scheint in Widerspruch zu stehen, daß die Botaniker nach der Methode von de Vries an allen Stellen der Pflanze dieselbe Lösungsdichte der Zelle angetroffen haben; aber dies kann nach der vorliegenden Anschauung auch gar nicht anders erwartet werden. Denn bei diesen Messungen steht sie immer unter einer Zwangswirkung von konstanter Größe, nämlich unter dem Einfluß einer zehnprozentigen Salpeterlösung und hat immer das Bestreben, den Zufluß dieser Lösung in die Zelle wie auch den Abfluß des Wassers aus der Zelle, soweit möglich zu verhindern, während die übrigen Tätigkeiten der Zelle ruhen. Dies wird aber durch eine für alle Zellen derselben Pflanze gleiche Lösungsdichte erreicht, die der zehnprozentigen Salpeterlösung entspricht.

Es mag noch auf das Folgende hingewiesen werden. Zum Leben der Pflanze ist nicht nur notwendig, daß der Transport der Nahrung in ihr überhaupt stattfindet, sondern für ihre Lebensbetätigung ist auch von größter Wichtigkeit die Zeit dieser Beförderung. Je kürzer diese Zeit, um so besser ist das Gedeihen der Pflanze. Um so schneller muß dann die Lösungsdichte wachsen. Es gibt nun aber eine bestimmte Grenze, über welche die Dichte in den Gefäßen nicht gesteigert werden kann, ohne die mit ihnen in Austausch tretenden Zellen in ihrer Lebenstätigkeit zu beeinträchtigen. Darüber hinaus muß das Wachstum aufhören. Nimmt man nun an, daß die ersten Pflanzen nur aus Zellen zusammengesetzt waren und noch keine Gefäßbündel hatten, so müssen sie niedriger gewesen sein als jetzt; erst durch die Verschmelzung mehrerer Zellen zu einem Gefäße und durch das Absterben der Zellen selbst ist die jetzige Höhe der Bäume möglich geworden. Eine weitere Vergrößerung der Gefäße wird theoretisch noch höhere Bäume erwarten lassen; nun muß aber mit der Höhe der Bäume auch der Einfluß des Winddruckes wachsen; und so ist dieser einer der Gründe, der das Wachstum der Bäume auf eine bestimmte Höhe und damit die Größe der Gefäßbündel bestimmt.

In entsprechender Weise kann die flächenförmige Ausbildung der Algen und der Mangel an Gefäßbündeln damit erklärt werden, daß die Salzlösung des Meereswassers zu konzentriert ist, um einen größeren Transport von Zelle zu Zelle zu gestatten, und daß er daher nur auf wenige Zellen beschränkt wird. Bei der dadurch bedingten flächenförmigen Ausdehnung der Pflanzen und der allseitigen Umhüllung mit Nährmitteln hat sich das Bedürfnis nach Gefäßen und Gefäßbündeln gar nicht herausstellen können.

2. Abschnitt.

Die Bedeutung der Großmolekel in der Physik.

16 Ich habe in dem ersten Abschnitt gezeigt, daß die Großmolekelvorstellung das van't Hoffsche Gesetz in der einfachsten Weise erklärt; auch habe ich versucht, für die Art der Zusammensetzung der beiden H_2O-Molekeln mit dem Großmolekelkern eine Anschauung zu finden. Nun hat man den osmotischen Druck mit den Erscheinungen der Dampfdruckverminderung, Siedepunkterhöhung und Gefrierpunktserniedrigung des Lösungsmittels, wenn in ihm ein fester Stoff gelöst ist, in Zusammenhang gebracht und diese auf die Wirkung des ersteren zurückzuführen gesucht. Es drängt sich daher die Frage auf, ob nicht die Bildung von Großmolekeln auch diese Erscheinung ausreichend zum Verständnis bringt.

Es ist ein französischer Physiker Raoult, der sich mit diesen Erscheinungen erfolgreich befaßt und die Proportionalität zwischen der Erniedrigung bzw. der Erhöhung des Druckes und der Menge des in der Volumeinheit aufgelösten Stoffes abgeleitet hat.

Raoult begann mit der Dampfdruckerniedrigung und machte seine Versuche nicht mit Lösungen in Wasser, sondern in den Lösungsmitteln Äther und Benzol und mit den festen Stoffen Salizylsäure, Benzoesäure und anderen. Die Wahl seiner Lösungsmittel verschaffte ihm größere und daher günstiger zu beobachtende Dampfdruckerniedrigungen, die Wahl seiner festen Stoffe, die nicht in Ionen aufgelöst werden, ließ ihn die Schwierigkeiten umgehen, die die Ionen der Auffindung der Gesetzmäßigkeiten in den Weg stellen. Er stellte z. B. in vier oben geschlossenen Röhren in bekannter Weise die Luftleere über Quecksilber her, ließ in der ersten Röhre reinen Äther emporsteigen, in den zweiten Äther, dem auf die Volumeinheit ein bestimmtes Gewicht Salizylsäure zugefügt war, in der dritten Äther, dem auf die Volumeinheit die doppelte Menge Salizylsäure gegeben war, während er die vierte Röhre zur Beobachtung des äußeren Luftdrucks unverändert ließ. Die emporgestiegenen Flüssigkeiten verdampften in den luftleeren Raum und drückten die Quecksilbersäule hinunter; und aus dem Vergleich der drei ersten Röhren mit der vierten bestimmte er die entsprechenden Dampfdrucke. Der Dampf des reinen Äthers drückte am stärksten, der mit der einfachen Salizylmenge geringer, der mit der doppelten Salizhlmenge doppelt so gering. Dasselbe Ergebnis lieferte die Benzoesäure bei ihrer Lösung in Äther. Wurden nun Lösungen von Salizyl und Benzoesäure in Äther derart hergestellt, daß gleich viele Molekeln des gelösten festen Stoffes in der Volumeinheit der Lösung waren, so waren die Druckunterschiede in beiden gleich, also nicht durch die Natur des gelösten Stoffes, sondern nur durch die Anzahl der Molekeln bestimmt.

Bezeichnet man mit p den Druck des Ätherdampfes, wenn dem Äther kein Salizyl beigemengt ist, mit p_1 den, wenn Salizyl beigemengt ist, so wird $\frac{p - p_1}{p}$, also die Druckdifferenz im Verhältnis zum Druck des Dampfes des reinen Lösungsmittels die relative Dampfdruckverminderung genannt. Bezeichnet man anderseits die Menge der Molekeln des Lösungsmittels in 1 ccm Lösung mit N, die Menge der Molekeln des gelösten Stoffes in diesem ccm mit m, so ist $\frac{m}{N+m}$ das Verhältnis der Anzahl der Molekeln des gelösten Stoffes zur Gesamtheit der Molekeln. Raoult zeigte nun, daß die beiden genannten Brüche gleich waren, so lange m klein gegen N ist. Diese Gleichung aber sagt aus, daß die Druckabnahme des Dampfes infolge der Auflösung eines Stoffes in dem Lösungsmittel sich zum Drucke des Dampfes des reinen Lösungsmittels verhält wie die Anzahl Molekeln des gelösten Stoffes zu der Gesamtzahl der Molekeln. Diese Beziehung ist eine sehr auffallende; aber zwischen der Druckänderung und dem Verhältnis $\frac{m}{N+m}$ einen kausalen Zusammenhang zu finden, der vorstellbar ist, ist nicht so einfach. Jedenfalls ist bisher noch keine Annahme von unmittelbar zwingender Kraft aufgestellt. Und dabei muß die Annahme noch gleichzeitig die Tatsache erklären, daß das Gesetz nur für kleine m gilt.

17 Die von mir nun zu gebende Erklärung fußt auf der Tatsache, daß eine Großmolekel dieselbe durchschnittliche Energie wie eine H_2O-Molekel oder eine Äthermolekel hat, nachdem der bei der Bildung auftretende Energieüberschuß ausgeglichen oder abgeleitet worden ist. Da aber ihre Masse

größer ist, muß ihre durchschnittliche Geschwindigkeit kleiner sein. Sie stößt nun mit ihresgleichen und mit den Kleinmolekeln zusammen, so daß die Molekeln des Lösungsmittels z. B. Wasser, abgetrennt werden können. Aber der übrigbleibende Großmolekelrest lagert sich auf Grund der eingetretenen Entwärmung oder, anders ausgedrückt, auf Grund der abgegebenen Energie eine neue H_2O-Molekel an. Es können daher die Großmolekeln ihre H_2O-Molekeln mit anderen Kleinmolekeln vertauschen, ebenso wie die Molekeln des reinen Lösungsmittels ihre Nachbarschaften vertauschen. Dann hängen an jedem Großmolekelkern im allgemeinen zwei H_2O-Molekeln, die aber in jedem Augenblick andere sein können. Frei von beiden H_2O-Molekeln zugleich wird eine Großmolekel äußerst selten sein und von einer auch nur für eine sehr kurze Zeit, kurz auch in bezug auf die Zeitspanne, während welcher sie dieselbe H_2O-Molekel festhält. Dann ist auch keine H_2O-Molekel derart bevorzugt, daß sie an einem Großmolekelkern dauernd haftet. Und ebenso gibt es auch keine H_2O-Molekel, die nicht nach ganz kurzer Zeit an einem Großmolekelkern haftet. Es sind daher in einer Lösung in jedem Augenblick dieselben Mengen Großmolekeln und Kleinmolekeln vorhanden wie am Anfang.

Wie wird sich nun eine Großmolekel an der Oberfläche der Lösung verhalten, wenn sie eine hinreichend große kinetische Energie aufgenommen hat, um den Zusammenhang mit der Lösung zu überwinden? Sollte die kinetische Energie der Großmolekel so groß werden, daß beide H_2O-Molekeln durch sie zur Selbständigkeit gelangen, dann steigen diese in die Luft, während sich an den entwärmten Rest zunächst eine und später auch die zweite H_2O-Molekel anlegen wird. Doch wird dieser Fall eine Ausnahme sein; denn die Zu- und Abnahme der kinetischen Energie kann nur eine allmähliche, keine sprunghafte sein; wenn aber diese soweit angestiegen ist, daß sie eine H_2O-Molekel freimacht, wird sich diese ablösen. Bei den darauffolgenden Schwankungen der Energie wird wieder eine neue H_2O angelagert und die Großmolekel zurückgebildet. Wird aber gar keine H_2O abgelöst, so bleibt die Großmolekel unverändert. Aber wie auch die Vorgänge sich in Wirklichkeit abspielen, jedenfalls ist die Erscheinung so, als wenn sich die Großmolekeln an der Verdunstung gar nicht beteiligen und nur die Kleinmolekeln verdunsten. Wenn daher in einer Lösung 90 Prozent Kleinmolekeln und 10 Prozent Großmolekeln sind, so werden sich auch nur 90 Prozent derjenigen H_2O-Molekeln, die unter gleichen Bedingungen reines Wasser verlassen würden, aus der Flüssigkeit loslösen und in den darüber liegenden Raum steigen. Wenn aber in der Zeiteinheit weniger Molekeln in den Raum verdunsten, so wird auch der Gleichgewichtszustand zwischen den in den Raum verdunstenden und den aus diesem Raum in die Flüssigkeit zurücktretenden Molekeln bei einer geringeren Dichte erreicht. Das heißt: die Dichte des Dampfes ist dauernd kleiner als wenn das reine Lösungsmittel verdunstet und zwar im Verhältnis der Zahl der ausgefallenen Kleinmolekeln oder der vorhandenen Großmolekeln, also im Verhältnis der Anzahl der Molekeln der gelösten Substanz zur Gesamtmolekelzahl, wie das Proportionalitätsgesetz von Raoult verlangt; und in demselben Verhältnis nimmt der Druck ab.

Doch gestaltet sich die Formel für die relative Dampfdruckverminderung etwas anders als bei Raoult. Denn das Verhältnis der Molekeln des aufgelösten Stoffes zur Gesamtmolekelzahl ist nicht $\frac{m}{N+m}$, sondern $\frac{m}{N-m}$. Bei der Lösung von m-Molekeln festen Stoffes in N Molekeln Lösungsmittel kommen zwar neue m Molekln in die Lösung; es fallen jedoch zwei m

Molekeln Lösungsmittel fort, so daß nur N—m Molekln bleiben. Die Formel muß dann lauten: $\frac{p-p_1}{p}=\frac{m}{N-m}$. Führt man in sie die beobachteten Werte für p, p_1, m, N ein, so ist auch diese Gleichung richtig unter der Voraussetzung, daß m klein ist; denn dann geht in beiden Fällen die rechte Seite im $\frac{m}{N}$ über. Nur muß nach Raoults Formel die relative Dampfdruckverminderung weniger rasch steigen als die Menge des zugefügten Stoffes, nach der neuen stärker. Daher könnte man aus der mehr oder weniger raschen Zunahme der Dampfdruckverminderung eine Entscheidung herbeiführen, welcher Formel mehr Vertrauen zu schenken ist. Aber die aus der Beobachtung gewonnenen Zahlen Raoults bieten unter sich solch unerwartete Abweichungen, daß man an der Genauigkeit der Beobachtungen selbst Zweifel hegen muß. Es ist daher ein dringendes Bedürfnis, die ganzen Versuche auf erweiterter Grundlage zu wiederholen. Dann ist aber auch noch sehr fraglich, ob die relative Dampfdruckverminderung allein von dem Verhältnis der Großmolekelzahl zur Gesamtmolekelzahl abhängt oder ob nicht noch andere Größen, z. B. die Oberflächenspannung, auf die Zahl der sich loslösenden Molekeln einwirken. Auch mag nicht in allen Fällen der Einfluß der Verdunstungsabkühlung an der Oberfläche in Rechnung gezogen sein. Demnach ist das ganze Gebiet noch weiter zu durchforschen. Aber dieselbe Beachtung, die die Forschung der Raoultschen Formel entgegengebracht hat, wird man der neuen Formel nicht verweigern dürfen.

18 Nun darf aber nicht verschwiegen werden, daß die Raoultsche Formel eine ganz wesentliche Stütze erhalten hat durch ihre Ableitung aus einer Beziehung, die zwischen der Dampfdruckverminderung und dem osmotischen Druck aufgestellt ist und für deren Ableitung drei Männer, van't Hoff, Arrhenius und Ostwald, sich bemüht haben. Van't Hoff hat gleich zwei Beweise gegeben; und wir wollen sie beide prüfen. Ehe auf den ersten eingegangen wird, ist es zweckmäßig, den von Arrhenius bei dem entsprechenden Beweise verfolgten Gedankengang näher zu betrachten.

Er denkt sich unter einer Glasglocke einen osmotischen Versuchsapparat aufgestellt, also ein größeres Gefäß mit Wasser, da hinein einen vertikalen Glaszylinder, dessen untere Öffnung durch eine Membran abgeschlossen ist, und in dem Zylinder eine Lösung etwa von $CuSO_4$. Die Glocke soll huftleer sein, so daß sich unter ihr nur Wasserdampf ausbreiten kann. Dann steht über der Lösung AB Wasserdampf und über dem Wasser CD gleichfalls Wasserdampf, der drückt. Nun nimmt Arrhenius an, daß diese Dampfdrucke die reinen Spannungen des Dampfes darstellen, der aus Lösung und Lösungsmittel entweicht, und daß der Unterschied derselben die relative Dampfdruckverminderung infolge der Auflösung von $CuSO_4$ darstellt. Wenn diese Annahmen richtig wären, so müßte aus ihnen gefolgert werden, daß Lösung und Lösungsmittel nicht verschiedenen, sondern denselben Dampfdruck hätten. Denn der tatsächliche Unterschied der beiden Drucke wird durch einen äußeren, mit der Dampfdruck-Verminderung in keinem Zusammenhang stehenden Umstand bewirkt, daß sich nämlich die beiden Flüssigkeitsoberflächen auf verschiedenen Niveaus befinden und das Gas über dem tieferen Niveau infolge der Gravitation dichter ist als über dem höheren. Sollen dann beide Gasdrucke vergleichbar gemacht werden, so müssen sie auf dasselbe Niveau gebracht werden; dann sind sie aber gleich. Man ersieht das sofort, wenn man in der Höhe des oberen Niveaus eine Schale mit Wasser aufstellt. Dann steht der aus ihr aufsteigende Wasserdampf unter einem Drucke, der mit dem über der Lösung gleich ist und gegenüber dem über

dem darunterliegenden Lösungsmittel um das Gewicht der, der Niveaudifferenz entsprechenden Dampfsäule kleiner ist. Auch bei dem Raoultschen Versuchen werden die Dampfdrucke unter gleichen Bedingungen gemessen, nämlich in einem Vakuum über Quecksilber, dem die äußere Luft Gleichgewicht hält. Auf Grund des Arrheniusschen Beweises, wenn er von dem hervorgehobenen Fehler befreit wird, dürften die Raoultschen Gesetze gar nicht existieren; und da sie bestehen, muß ihre Ableitung falsch sein.

Der gegen Arrhenius' Gedankengang hier erhobene Einwand gilt in gleicher Weise gegen die Beweisführung Ostwalds, die nur etwas mathematischer klingt. Van't Hoff hat Arrhenius' Gedankengang nicht übernommen; er geht zwar von demselben idealen Versuche aus, fährt dann aber in seinem Werke fort: „Wie aber die Tensionsabnahme dem Druck der Dampfsäule über CD (dem Lösungsmittel) entspricht, so entspricht der Druck der auf AB (der osmotischen Membran) ruhenden Flüssigkeitssäule dem osmotischen Druck P_1; und falls man beide auf gleiche Oberflächengröße bezieht, verhält sich die Tensionsabnahme zum osmotischen Druck wie das Gewicht irgendeines Dampfvolums zum Gewichte des gleichen Volums vom Lösungsmittel.“ Er macht also diese Proportion zur Voraussetzung für die Ableitung des Raoultschen Gesetzes. Das Raoultsche Gesetz sagt aber im Grunde genommen nichts anderes aus als diese Proportion. Er will also das Raoultsche Gesetz mit dem Raoultschen Gesetze beweisen! Ein äußerst bequemer, aber auch völlig wertloser Weg.

19 Seinen zweiten Beweis bezeichnet er als thermodynamisch. Er legt, wie auch sonst gern, einen idealen Vorgang, einen Kreisprozeß zugrunde, der bei konstanter Temperatur verlaufen soll, und will ihn, wie er sagt, „osmotisch und reversibel, also mit Kolben und Zylinder“ durchführen. Besondere Klarheit kann man diesen seinen Worten nicht nachrühmen. Ein Vorgang ist reversibel, wenn die Zustandsänderungen, die beim Übergang vom Anfangszustand zum Endzustand in einer bestimmten Reihenfolge vor sich gehen, bei der Rückbildung in genau entgegengesetzter Reihenfolge derart erfolgen, daß je zwei entsprechende Änderungen gleiche Größe und entgegengesetzten Sinn haben. Bewegt sich der Zustand eines Gases in einem pv Koordinatensystem auf einer Kurve von A nach B, so muß er bei der Rückbewegung auf derselben Kurve fortrücken; dann ist die von den beiden eingeschlossene Fläche, also die bei dem Kreisprozesse aufgenommene oder abgegebene Arbeit gleich Null. Nun will van't Hoff einer Kg-Molekel H_2O, also 18 kg Wasser, die die verschwindend kleine Menge da feste Substanz enthält, eine gewisse Menge Wasser mit Hilfe der Luftpumpe entziehen. Dabei kühlt die Lösung infolge der Verdunstung ab, während sie nach van't Hoffs Ansicht unverändert bleibt. Er will dann eine gleiche Menge H_2O verdampfen, der etwas stärker konzentrierten Lösung den Dampf hinzufügen und dort zur Kondensation bringen. Die Lösung wird dadurch wieder verdünnt, erwärmt und in den alten Zustand zurückgeführt. Van't Hoff behauptet nun, daß sich dabei der osmotische Druck von p auf p—dp herabgemindert habe, und dieses dp solle die Dampfdruckabnahme darstellen. Er macht bei diesem Schlusse den Fehler, daß er den Zuwachs von p auf p + dp auf dem Wege AB der Zustandsänderung übersieht und nur die Abnahme um dp auf dem Rückwege BA anerkennt. In Wirklichkeit muß der Zuwachs dp auf dem Hinwege durch die Abnahme dp auf dem Rückwege ausgeglichen werden: dann darf aber gar keine Dampfdruckabnahme eintreten, die doch der Raoultsche Versuch zeigt.

Demnach hat van't Hoff auch bei diesem zweiten Versuch, die Dampfdruckverminderung als eine Folge des osmotischen Druckes hinzustellen,

einen untauglichen Weg eingeschlagen; und da sein Gedanke, von seinen Irrtümern befreit, zu dem Ergebnis führt, daß dann keine Dampfdruckverminderung in die Erscheinung treten darf, so darf angenommen werden, daß zwischen osmotischem Druck und Dampfdruckverminderung kein unmittelbarer Kausalzusammenhang besteht. Man sieht aber auch an diesem Beispiel, daß ein thermodynamischer Beweis nicht ohne Kenntnis des zugrunde liegenden Mechanismus geführt werden kann.

Legt man aber die Großmolekelvorstellung der Erklärung des van't Hoffschen und des Raoultschen Gesetzes zugrunde, so folgen beide Gesetze unmittelbar aus ihr; und die Versuche, auf einem Umwege den Zusammenhang beider zu erschließen, ist zwecklos, da dieser von selbst einleuchtet. Die unklaren Gedankengänge van't Hoffs und seiner Anhänger werden durch eine klare Einsicht ersetzt.

20 Ich wende mich nun zu der Siedepunktserhöhung. Bei der Verdampfung spielt sich die Loslösung der Molekeln des Lösungsmittels voneinander unter anderen Bedingungen ab als bei der Verdunstung. Während bei dieser die kinetische Energie der Molekeln nach der Wahrscheinlichkeit um einen Mittelwert schwankt, der der Temperatur entspricht, ist bei jener der entsprechende Mittelwert so nahe an die Verdampfungstemperatur herangerückt, daß von Schwankungen um diesen Mittelwert gar keine Rede mehr sein kann. Die im Überfluß zuströmende Wärme wird nicht mehr zur Erhöhung der Durchschnittstemperatur verwertet, sondern wird von den Molekeln bis zur Grenze ihrer Fassungskraft aufgenommen, so daß sie bei weiterer Zufuhr die innere Arbeit des Zerfalls der Molekelkomplexe leistet. Dann nehmen alle H_2O-Molekeln die Geschwindigkeit der Temperatur von 100 ° C an und die H_2O-Teile der Großmolekeln ebenfalls diese Geschwindigkeit: das heißt: die Großmolekeln haben eine kinetische Energie, die einer höheren Temperatur als 100 ° C entspricht, da ihre Masse größer ist als die einer Kleinmolekel. Nimmt man nun an, daß die kinetische Energie der Molekel des gelösten Stoffes bei 100 ° C dieselbe wie die einer H_2O-Molekel ist, so hat die Großmolekel während des Verdampfungsprozesses die dreifache Energie der H_2O-Molekel. Dann muß die Durchschnittsenergie der ganzen Lösung größer sein als diejenige, die der Temperatur von 100 ° entspricht. Die dadurch bedingte Temperaturerhöhung der Lösung, die am Thermometer abgelesen wird, nimmt genau im Verhältnis der vorhandenen Großmolekeln, also auch im Verhältnis des gelösten Stoffes zu. Es ist aber dabei zu bemerken, daß die eigentliche Verdampfungstemperatur, nämlich die Temperatur des sich ablösenden Dampfes, doch die von 100 ° bleibt, und nur die Einwirkung der Gesamtheit der schwingenden Groß- und Klein-Molekeln auf das Meßinstrument in der Flüssigkeit eine höhere Temperatur anzeigt. Während der Verdampfung muß also die Lösung eine höhere Temperatur aufweisen als der abziehende Dampf.

Dies ist auch tatsächlich der Fall und schon vor 90 Jahren von dem Schweden Rudberg festgestellt. Aber seine Beobachtungen wurden von der Wissenschaft nicht anerkannt, vielmehr lebhaft bestritten, und zwar nicht auf Grund abweichender Beobachtungsresultate, sondern auf Grund theoretischer Überlegungen. Nun, diese theoretischen Überlegungen müssen eben falsch gewesen sein. Aber ich habe bis jetzt noch nicht gelesen, daß seine Beobachtungen später als richtig anerkannt sind; und so bin ich möglicherweise der erste, der seinen Forschungen eine nachträgliche gerechte Würdigung verschafft. Die Großmolekelvorstellung sieht die Beobachtungsergebnisse von Rudberg voraus; daher bieten diese eine willkommene Stütze für die neue Vorstellung.

Bekanntlich gilt das Raoultsche Gesetz der Proportionalität zwischen der Menge der gelösten Substanz und der Erhöhung des Siedepunktes nicht allgemein; sondern es erweist sich in bestimmten Fällen die Temperatur höher, als der Menge der gelösten Substanz entspricht. Diese Abweichung der Beobachtung vom Gesetze muß natürlich auch erklärt werden; und die Möglichkeit dazu bietet gleichfalls die Großmolekelvorstellung. Denn aus bald anzustellenden Betrachtungen wird es wahrscheinlich, daß bestimmte Ionen von Salzen mehr als zwei H_2O an sich anlegen; in diesem Falle muß aber die Temperatur der Lösung während der Verdampfung höher steigen, als die Berechnung nach der Molekelmenge des gelösten Stoffes zuläßt. In diesem Falle ist aber die Erhöhung des Siedepunktes geeignet, einen Rückschluß auf die Zahl der Kleinmolekeln zu machen, die in einer Großmolekel enthalten sind.

21 Es bleibt noch übrig, die gleichfalls scheinbare Gefrierpunkterniedrigung der Lösungen durch die Großmolekelvorstellung zu erklären. Da die Durchschnittsgeschwindigkeit der Großmolekel bei derselben Temperatur kleiner als die der Kleinmolekel ist, so haben die H_2O-Molekeln einer Großmolekel, für sich betrachtet, eine Geschwindigkeit bei 0° C, die zu einer niedrigeren als 0° C gehört. Nimmt man nun an, daß die Kristallisation erst beginnen kann, wenn die kinetische Energie der kristallisierenden Molekel unter eine bestimmte Grenze gesunken ist, so wird die Anlagerung der Molekeln des Lösungsmittels aneinander auch erst bei dieser Temperatur möglich, folglich auch der Zerfall der Großmolekeln. Die hierbei austretenden H_2O-Molekeln haben dann eine Temperatur unter Null. Die zurückbleibende Molekel fester Substanz lagert sich sofort wieder ein oder zwei H_2O-Molekeln von 0° C an, erhöht dadurch die Temperatur der neuen Großmolekel und gleicht durch ihre Zusammenstöße mit den kälteren Kleinmolekeln die kinetischen Energien gegenseitig aus. Die dadurch bedingte Temperaturerhöhung wird durch die benachbarte Kältequelle, die ja die Ursache des Gefrierens des Lösungsmittels ist, wieder beseitigt. Es befinden sich daher in der Lösung Kleinmolekeln von der Temperatur 0°, Großmolekeln von der Temperatur 0° und die grade zerfallenden Großmolekeln, die eine kinetische Energie haben gleich $^1/_3$ von der kinetischen Energie einer Molekel von der Temperatur 0°, also angenähert die Temperatur + 91° T ($^1/_3$ von 273° absolut). Beim Zusammenstoß dieser Molekeln auf die Glaswand des Thermometergefäßes ist die durchschnittliche kinetische Energie sämtlicher auftreffenden Molekeln kleiner als die kinetische Energie einer H_2O-Molekel von 0° C. Demnach muß aus dem Thermometergefäß Wärme abfließen, dasselbe also eine Temperatur unter 0° anzeigen. Je mehr Großmolekeln in der Lösung sind, um so mehr sind auch im Verfall begriffen. Die Temperaturerniedrigung muß also proportional sein der vorhandenen Anzahl der Großmolekeln, also der Menge des gelösten Stoffes, wie das Raoultsche Gesetz fordert. Eine Abweichung von dieser Proportionalität kann erst eintreten, wenn sich die äußeren oder inneren Bedingungen des Versuches ändern. Zu den äußeren Bedingungen gehört zunächst die Vorsorge für ein gleichmäßiges Abfließen der Wärme nach der Kältequelle, da dieses ja die Grundbedingung für die ganze Erscheinung ist; ferner ist ein hinreichend großer Überschuß von freien H_2O-Molekeln erforderlich, damit Zerfall und Neubildung von Großmolekeln nicht durch mangelndes H_2O beeinflußt wird. Daher spielt die Konzentration der Lösung eine wichtige Rolle, so daß das Raoultsche Gesetz nur bei geringer Konzentration gültig ist. Zu den inneren Bedingungen gehört der Einfluß des Kristallwassers auf die Salzbildung wie auch die Wärme, die bei der Bildung der Salze aus den Ionen abgegeben wird. Beide müssen herangezogen

werden, um die Abweichungen der Gefrierpunktserniedrigung vom Raoultschen Satze zu erklären. Da eine von van't Hoff aufgestellte Formel auf Erwägungen beruht, die diese Gesichtspunkte unberücksichtigt lassen, kann ihr weder eine allgemeine noch eine besondere Gültigkeit zugesprochen werden.

Es mag noch gestattet sein, einen Schluß zu ziehen, der, wenn auch seine Richtigkeit bestritten werden sollte, doch geeignet sein dürfte, die in Frage kommenden Vorstellungen zu erweitern. Für die Rohrzuckerlösung in Wasser hat Raoult die molekulare Gefrierpunktserniedrigung auf 18° C bestimmt, wenn nämlich 1 Mol Zucker = 342 g in 100 g Wasser gelöst ist. Da aber 100° Wasser etwa 5,6 Mol enthalten, so muß die Gefrierpunktserniedrigung von 1 Mol Zucker, welches in 1 Mol Wasser aufgelöst wird, — wenn dieses möglich wäre — gleich $18 \times 5{,}6 \sim 100°$ C und von 1 Mol Zucker, welches in 2 Mol Wasser gelöst ist, $18 \times 2{,}8 \sim 50°$ C sein. Diese 50° Temperaturerniedrigung muß das Mol Zuckerlösung bei seiner Zerspaltung abgeben. Und da das abgespaltete Mol Zucker sich mit anderen H_2O-Molekeln unter Steigerung der Energie zu Zuckerlösung zusammenlagert, so kann die Abgabe der 50° C nur auf Kosten der 2 Mol Wasser geschehen; oder jede Molekel Wasser muß von ihrer Wärme dazu 25° beitragen. Aber jede Molekel Wasser, die abgespalten ist, erniedrigt die Temperatur von 273° T auf 91° T, also um 182° C. Da nun die wirkliche Temperaturerniedrigung nur 25° beträgt, so können nicht alle Großmolekeln zu gleicher Zeit im Zustand der Zerspaltung sein, sondern unter je 182 nur 25.

22 Das van't Hoffsche Gesetz über den osmotischen Druck und die Raoultschen Gesetze über Dampfdruck- und Gefrierpunkterniedrigung sowie über Siedepunkterhöhung finden, wie ich wohl sagen darf, eine überraschend einfache Erklärung durch die Großmolekelvorstellung und damit überhaupt die erste ausreichende Erklärung. Denn die Erklärung der Raoultschen Gesetze durch den osmotischen Druck ist so lange nicht als ausreichend oder überhaupt vorhanden anzuerkennen, als nicht ein unmittelbar einleuchtender kausaler Zusammenhang zwischen beiden aufgedeckt ist. Alle vier Erscheinungen beruhen auf der hemmenden Wirkung, die die zum Lösungsmittel zugeführte feste Substanz ausübt, während van't Hoff diese Hemmung bei den Raoultschen Gesetzen gelten läßt, bei den osmotischen aber der festen Substanz, wenigstens bei seiner ersten Auffassung, die direkte Druckerzeugung zuschreibt. Diese eine Tatsache spricht schon gegen van't Hoff und seine Anhänger. Zwischen den osmotischen Versuchen und denen Raoults besteht noch ein hier besonders zu betonender Unterschied. Bei der Osmose werden zwei verschiedene Drucke in demselben Versuch miteinander verglichen, der Druck über und unter der Membran; und beobachtet wird der Druckunterschied beider in der von ihm geleisteten Arbeit. Bei den drei anderen Versuchsgruppen wird jedesmal nur e i n Druck bzw. e i n e Temperatur in einem Versuchsgange ermittelt und die so gewonnenen Größen miteinander verglichen. Bei dieser letzteren Gruppe können daher gar keine osmotischen Wirkungen auftreten, weil sie ja in der Differenz zweier Drucke bei e i n e m Versuche bestehen. Deshalb stehen sie mit den osmotischen Erscheinungen in gar keiner unmittelbaren Beziehung. Daher waren auch die Versuche van't Hoffs, Arrhenius', Ostwalds, einen Zusammenhang zwischen ihnen nachzuweisen, von vornherein zur Unfruchtbarkeit verurteilt; daher mußten ihre dahingehenden Beweise falsch werden; und es ist nur zu verwundern, daß diese Forscher der Unklarheit, die ihrem Denken zugrunde lag, nicht bewußt geworden sind, sondern daß sie Formeln auf Formeln ge-

häuft haben, ohne aus der rechnungsmäßigen Abhängigkeit der Größen zu einer ursächlichen überzugehen.

Das einzige Band, welches alle vier Erscheinungsgruppen verknüpft, ist die von mir aufgestellte Großmolekelvorstellung. Daß sie nur eine Hypothese ist, deren Wert zunächst allein nach dem Umfang ihrer Erklärungsbefähigung festgestellt werden kann, ist zuzugeben; aber sie erklärt die vier Erscheinungen, und sicherlich besser, als es die unklare Vorstellung vom osmotischen Druck vermocht hat. Sie ist aber auch fähig, die Abweichungen von den Raoultschen Gesetzen aufzuklären und kann auch andere Gebiete neu beleuchten, wie wir gleich sehen werden. Dagegen läßt sich durch Versuche noch nicht unmittelbar zeigen, daß sich eine Molekel des festen Stoffes mit zwei H_2O-Molekeln vereinigt. Jedoch wird im vierten Abschnitt an einem längst bekannten elektrolytischen Versuche gezeigt, daß an der Kathode infolge des Zerfalls von Großmolekeln größere Wassermengen frei werden, an der Anode durch Bildung von Großmolekeln verschwinden.

23 Es ist schon darauf hingewiesen worden, daß mit der Großmolekelbildung ein Freiwerden von Energie verknüpft ist, indem sich die Energie dreier Molekeln auf *einen* Träger vereinigt. Diese, beim Verschwinden selbständig gewesener Molekeln freigewordene Energie kann man zu berechnen suchen. Verliert eine Molekel des gelösten Stoffes und eine H_2O-Molekel ihre Selbständigkeit, um mit einer zweiten H_2O-Molekel eine Großmolekel zu bilden, so muß die Wärme der beiden ersten Molekeln abgegeben werden. Nimmt man nun an, daß die Wärme des Großmolekelkerns gleich der einer H_2O-Molekel ist, so wird die Wärme von zwei H_2O-Molekeln frei. Nun fragt es sich, welche Wärme von dem Wasser abgegeben wird, die ganze Wärme, die, vom absoluten Nullpunkt an gerechnet, in ihm vorhanden ist, oder eine geringere. Es soll nun angenommen werden, daß der flüssige Körper diejenige Wärme, die er im Festzustande aufweist, auch dann behält, wenn er den Zustand einer selbständigen flüssigen Molekel aufgibt, und daß er nur die darüber hinausgehende Wärme abgibt. Zu dieser Annahme führt die folgende Überlegung. Die Atomwärme der Elemente im festen Zustande ist nach dem Dulong-Petitschen Gesetze annähernd konstant; und die Abweichungen einiger Elemente von diesem Gesetz werden um so geringer, je mehr sich diese Elemente dem Schmelzpunkte nähern. In der Nähe des Schmelzpunktes scheinen daher alle Elemente als Atome ihre Wärmeschwingungen auszuführen. Das gleiche darf von den Verbindungen der Elemente im festen Zustande angenommen werden. Es ist nun nicht zu erwarten, daß die Wärme aus einer flüssigen Molekel bei Aufgabe ihrer Selbständigkeit verschwinde, um nachher beim Übergang in den festen Zustand wieder aufzutreten.

Die auf Grund dieser Annahme von 1 g H_2O bei Aufgabe der molekularen Selbständigkeit abgegebene Wärmemenge beträgt in Gestalt von Schmelzwärme 80 cal und auf Grund des Temperaturunterschiedes zwischen der Schmelztemperatur von Wasser und der durchschnittlichen Beobachtungstemperatur von 15 ° C weitere 15 cal, also im ganzen 95 cal. Dem Verschwinden von 1 Mol H_2O, also 18 g aus dem Zustande der Selbständigkeit, entspricht demnach die Wärme von 1710 cal. Diese Wärme ist recht beträchtlich; und es fragt sich, ob sie nicht in vielen Fällen ausreicht, die Lösungswärme vollständig zu erklären. Ja, wenn die Wärme von 2 Mol Wasser abgegeben wird, so steigt sie sogar auf 3420 cal. Dies ist aber nur der Fall, wenn sich die Molekeln einer Flüssigkeit mit 2 H_2O verbinden, da in diesem Falle aus 3 Flüssigkeitsmolekeln 1 Großmolekel wird. Wird dagegen aus der Molekel eines festen Stoffes mit 2 H_2O-Molekeln eine Großmolekel gebildet, so muß

die erstere von den beiden Wassermolekeln die nötige Wärme empfangen, um den festen Zustand aufzugeben. Dann wird die abgegebene Wärme kleiner als 3420 cal sein. Dann besteht eben die obengemachte Annahme nicht, daß die kinetische Energie des Großmolekelkerns gleich der einer H_2O-Molekel ist.

Die Betrachtung zeigt aber, daß bei der Bestimmung der Verbindungswärme chemischer Prozesse die Mengen, die auf den wirklichen chemischen Prozeß entfallen, zu sondern sind von denjenigen der Lösungswärme, die dem Verschwinden selbständig gewesener Molekeln entstammen. Außerdem hat man bei der Spaltung des gleichen Stoffes in Ionen noch die Ionisierungswärme zu berücksichtigen. Die bei der Lösung irgendeines Stoffes in einem Lösungsmittel auftretende Wärmemenge ist dann als die algebraische Summe dieser drei Wärmearten aufzufassen.

24 Unter diesem Gesichtspunkt soll die Lösung von H_2SO_4 in Wasser, deren Wärmetönung von Pfaundler und Pickering sehr sorgfältig untersucht ist, einer kurzen Betrachtung unterzogen werden auf Grund der beistehenden Tabelle:

H_2SO_4	H_2	Entwickelte Wärme in cal. Pfaundler	Pickering
1 Mol	½ Mol	3660	—
1 „	1 „	6776	6667
1 „	1½ „	8680	—
1 „	2 „	9998	9906
1 „	2½ „	10955	—
1 „	3 „	11785	11698
1 „	4 „	12858	12902
	5 „	13652	13742
	6 „	14395	14407
	∞ „	17699	17648

Nach den Pfaundlerischen Versuchsergebnissen bedingt die Anlagerung des ersten Mol H_2O 6776 cal. Zieht man 1710 cal für das Ausscheiden von 1 Mol H_2O aus dem Zustande einer selbständigen Molekel ab, so bleiben 5066 cal als Wärme des chemischen Prozesses übrig. Die Anlagerung des zweiten Mol H_2O bringt die Wärmeabgabe von 3222 cal mit sich, von denen auf den eigentlichen chemischen Prozeß nur 1522 cal entfallen. Bei Aufnahme des dritten Mol H_2O werden 1785 cal frei, also wenig mehr als das Mol H_2O bei der Aufgabe seiner Selbständigkeit abgibt. Es ist daher von einer chemischen Wirkung bei der Anlagerung kaum noch die Rede. Der weitere Zuwachs der Wärmeabgabe bis zum Maximum beträgt 5905 cal, welche Zahl zwischen 3×1710 und 4×1710 liegt. Es darf jedoch daraus nicht geschlossen werden, daß die weiter angelegten H_2O zwischen 3 und 4 Mol liegen. Denn es ist noch die Ionisierungswärme zu berücksichtigen, die mit der Abspaltung der Ionen H von SO_4 verknüpft ist und die gleichfalls in den 5905 cal eingeschlossen ist. Nun hat Ostwald diese auf — 800 cal berechnet: das heißt, wenn ein Mol H aus dem neutralen in den Ionenstand übergeht, so nimmt es 800 cal auf. Diese 800 cal können nur dem Wärmevorrate entnommen werden, welcher in der Schwefelsäurelösung steckt. Demnach muß die durch die weitere Großmolekelbildung abgegebene Wärmemenge um $2 \times 800 = 1600$ cal größer sein, als 5095 angibt, also 7505 betragen haben. Diese Zahl liegt zwischen 4×1710 und 5×1710. Es ist daher zu vermuten, daß ein Mol H_2SO_4 beim Übergang in den Ionenzustand oder, was dasselbe ist, bei seiner Auflösung in einer großen Menge Wasser $3 + 4$ oder $3 + 5$ Mol H_2O an sich anlagert. Von den beiden Zahlen 7 und 8 soll 8 gewählt werden in der

Voraussetzung, daß nach der Anlagerung des zweiten Mol H_2O die ganze weiter abgegebene Wärme keine Wärme eines chemischen Prozesses, sondern nur Anlagerungswärme ist und daß alle Großmolekeln H unter sich gleich sind, ebenso wie alle Großmolekeln SO_4 es unter sich sind.

25 Daß die bei der Großmolekelbildung freiwerdende Wärme kein genaues Vielfache von 1710 cal ist, kann gegen die Betrachtungsweise keinen erheblichen Einwand bilden, da einerseits die Zahl 1710 nur unter der Voraussetzung gültig ist, daß alle Messungen bei einer Temperatur von 15° gemacht sind, anderseits die Ostwaldsche Zahl — 800 für die Ionisationswärme des H schon wegen ihrer abgerundeten Zahl — 800 nicht als ganz genau anzusehen ist. Auch ist zu bemerken, daß die Pickeringschen Zahlen ein etwas günstigeres Ergebnis liefern würden. Aber die Übereinstimmung und Nichtübereinstimmung der Zahlen untereinander ist nicht größer, als sie auf anderen Gebieten der Physik gewesen ist, wo ihre Abweichung nicht gehindert hat, Schlüsse zu ziehen, die die Grundlage neuer Theorien bildeten. Nur geben diese neuen Theorien, wenn ihnen irgendein Wert zuzusprechen ist, Anlaß, den Grund der bisherigen Nichtübereinstimmung aufzusuchen und durch weitere Untersuchungen die schmale Grundlage, auf die sich die Annahme stützt, zu erweitern. So mag es gestattet sein, aus der wahrscheinlich gemachten Großmolekelbildung weitere Schlüsse zu ziehen.

Zunächst muß ein leicht zu erwartender Einspruch beseitigt werden. Bisher ist angenommen, daß sich im allgemeinen eine Molekel des gelösten Stoffes mit zwei H_2O zu einer Großmolekel vereinigt. Danach sollte sich ein H_2SO_4 mit 2 H_2O verbinden und nicht mit 8. Aber diese Annahme stützt sich auf das van't Hoffsche Gesetz der Osmose, das jedoch nicht mehr für elektrolytisch zerspaltbare Salze gilt. Für diese gilt die Erweiterung von Arrhenius, nach welcher H_2SO_4 in 3 Ionen, in 2 H-Ionen und 1 SO_4-Ion zerfällt. Danach ist zu erwarten, daß sich an diese 3 Ionen 6 H_2O anlegen, um 3 Großmolekeln zu bilden. Nun zeigt die Berechnung aus den Pfaundlerschen Zahlen, daß 8 H_2O in Frage kommen. Man kann nun zu dem Schluß kommen, daß die beiden ersten H_2O, welche durch chemische Wirkung angeknüpft sind, bei der Anlagerung von H_2O nicht mitsprechen, und daß dann in der Tat die übrigen 6 die Ionenbildung übernehmen. Es ist aber auch eine andere Auffassung möglich. Die 8 H_2O können sich in der Weise verteilen, daß an jedes H 2 H_2O und an SO_4 4 H_2O treten, ohne daß die chemische Bindung der ersten 2 H_2O zur Erklärung herangezogen wird. Diese Auffassung würde die Anlagerung der H_2O von dem chemischen Wert des Ions abhängig machen und die Großmolekelzusammensetzung mit den chemischen und elektrischen Vorgängen in Verbindung bringen. Daß eine solche Auffassung, wenn sie Erfolg hat, besonders geeignet ist, ein tieferes Eindringen in das Wesen der Dinge zu ermöglichen, darf nicht bezweifelt werden.

Wird NaCl in Ionen zerspalten, so legen sich nach dieser Auffassung an jedes Na 2 H_2O und an jedes Cl 2 H_2O an. Wird Na_2SO_4 gespalten, so lagern sich an jedes Na wieder 2 H_2O und an jedes SO_4 4 H_2O an. Wird $CuSO_4$ dissoziiert, so haften an jedem Cu und an jedem SO_4 4 H_2O. Bei der Dissoziation von H_3PO_4 vereinigt sich PO_4 mit 6 H_2O usw. Ob und wie weit diese Auffassung der Wirklichkeit entspricht, können nur umfangreiche Untersuchungen feststellen. Sie allein auf die Pfaundlerschen Zahlen zu stützen, ist nicht gestattet. Wohl aber ist es erlaubt, aus dieser Auffassung die Folgerungen zu ziehen. Und eine dieser Folgerungen ist, wie wir im folgenden Abschnitt sehen werden, die, daß das Faradaysche Gesetz der Elektrolyse ohne die Vorstellung elektrischer Ladungen begründet werden

kann. Daraus ergibt sich aber die Wichtigkeit, diese Auffassung auf das sorgfältigste zu stützen oder zu widerlegen.

26 Wir wollen uns hier begnügen, einige andere Folgerungen zu ziehen, die für das Spätere von Nutzen sein werden. Zunächst erhält die Auflösung fester und flüssiger Stoffe in einem Lösungsmittel durch die Großmolekelbildung eine neue Beleuchtung. Im Grunde beruhen ja auf dieser Auflösung die osmotischen Erscheinungen ebenso wie die von Raoult untersuchten; und die mechanische Bildung einer Großmolekel ist allen Lösungsvorgängen zugrunde zu legen. Es kommt daher nur darauf an, die Energiequelle nachzuweisen, die diese Vorgänge ermöglicht, ja notwendig macht.

Man kann nun vermuten, daß sie in dem Energievorrate derjenigen Molekeln des Lösungsmittels zu suchen ist, die den durchschnittlichen Wert der Energie hinreichend überschreiten. Dann müßte mit der Lösung grundsätzlich eine Abkühlung verbunden sein, die aber nicht allgemein beobachtet wird. In Wirklichkeit muß an derjenigen Stelle, wo die kinetische Energie der Molekeln des Lösungsmittels groß genug geworden ist, um die Kohäsion des festen Stoffes aufzuheben, nach verschwindend kurzer Zeit die Energie so weit abgenommen haben, daß die Kohäsion zwischen den Molekeln des festen Stoffes wieder voll zur Geltung kommt und der alte Zusammenhang zurückgebildet wird. Die schwankende Größe des Energievorrates einer flüssigen Molekel ist daher wohl imstande, die Lösung an beliebigen Stellen einzuleiten, aber nicht imstande, sie dauernd aufrecht zu erhalten. Will man dann darauf hinweisen, daß sich die abgetrennten Molekeln des festen Körpers an die Molekeln des Lösungsmittels anlegten und dadurch der Wirkungssphäre der Kohäsion der festen Partikeln untereinander entzogen würden, und wollte man in dieser Anlehnung die Energiequelle für den weiterlaufenden Vorgang finden, so ist dieser Gedanke durchaus nicht ohne weiteres zurückzuweisen; aber dann hat man den ersten Schritt zur Großmolekelvorstellung getan. Dann hat man sich die Frage zu beantworten, bei welchem Vorgange es sich um mehr Energie handelt, bei dem Abspalten fester Masse von fester Masse oder bei der Anlagerung von fester und flüssiger Masse. Da aber im allgemeinen feste Masse an fester Masse fester haftet als flüssige an fester, so wird man geneigt sein, zu schließen, daß der Energieverbrauch beim ersten Vorgang den Energiegewinn beim zweiten übersteigt. Dann kommt aber die Lösung zum Stillstand, noch ehe sie eigentlich begonnen hat.

Anders wird sich der Vorgang abspielen, wenn eine dauernde Energiequelle zur Verfügung steht, die die Trennungsarbeit leistet. Diese wird nun in der Energiegabe bei der Bildung der Großmolekel gesehen, welche die Rückgängigmachung der Lösung des festen Stoffes verhindert. Danach ist die Großmolekelbildung die Vorbedingung für die Lösung; und diese kann nur eintreten, wenn die bei der Großmolekelbildung auftretende Energieabgabe groß genug ist, um die Kohäsion aufzuheben. Ist sie zu klein, kommt keine Lösung zustande; ist sie zu groß, so tritt zu der Auflösung noch eine Erwärmung der Lösung hinzu. Im ersten Falle kann natürlich durch Zuführung von Wärme von außen nachgeholfen werden, so daß die Auflösung des festen Körpers trotzdem vor sich geht.

Die gleichmäßige Ausbreitung des gelösten Körpers durch die ganze Lösung, also die eigentliche Diffusion, beruht neben den Strömungen in der Flüssigkeit und der Mischung auf Grund der kinetischen Energie der Molekeln auch auf dem Austausch der Molekeln des Lösungsmittels mit den gleichartigen Molekeln der Großmolekeln und wird nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit innerhalb einer bestimmten Zeit erreicht.

27 Wie die Abschnürung der Kernmolekel bei der Lösung, läßt sich auch die

Zerspaltung der Salzmolekeln in Ionen verständlich machen. Auch sie geht von selbst vor sich, wenn weitere H_2O-Molekeln durch Verzicht auf ihre Selbständigkeit weiter Energie abgeben. Schon die beiden ersten H_2O-Molekeln, die sich auf Grund der bei der Großmolekelbildung freiwerdenden Energie an die Salzmolekel anlegen, werden diejenigen Plätze aufsuchen, an denen ihre überschüssige freie Energie Verwendung finden, also die Kohäsion oder Affinität überwinden kann. Das sind aber diejenigen Stellen, an denen die Zerfallprodukte, die Ionen, zusammenhaften. Dieses Haften ist kein unmittelbares Aneinanderbefestigtsein: vielmehr befinden sich die Ionen in ständigen Schwingungen von und zu einem gemeinsamen Mittelpunkt, dem sie sich nähern und von dem sie sich entfernen, und in einem beständigen Rotieren um die Achse dieser Schwingungen in demselben Sinne, in dem auch die H_2O rotieren. In diesen Strudel können auch andere H_2O-Molekeln hineingezogen werden, wenn ihre Bewegungsrichtung mit der der ersten übereinstimmt. Dadurch wird die Energie dieses ganzen Molekelkomplexes weiter gesteigert, bis die Kohäsion zwischen den Ionen aufgehoben ist und jedes Ion als selbständiges Gebilde sich weiterbewegt. Man kann sich diesen Vorgang so vorstellen, daß die neu eindringenden H_2O-Molekeln durch die Abgabe ihrer freiwerdenden Energie eine Vermehrung des mittleren Abstandes der Ionen bewirken und die Geschwindigkeit der um die Ionenkerne rotierenden H_2O-Molekeln vergrößern. Dadurch allein sowie auch durch die von außen in die größer gewordene Lücke zwischen den Ionenkernen eindringenden H_2O-Molekeln werden die beiden Ionen auf rein mechanische Weise voneinander getrennt.

Bezeichnet man nun den Teil des Ions, an welchem die H_2O-Molekeln haften, also den Ionenkern, als den Kopfteil, und den abgewandten Teil, der aus den rotierenden H_2O-Molekeln gebildet ist, als den Flächenteil, so ist dadurch eine bestimmte Orientierung seiner Teile gegeben. Um eine NaCl-Molekel in Ionen zu zerspalten, sind 4 H_2O erforderlich, von denen 2 bereits bei der Loslösung des festen NaCl von gleichartigen Molekeln angelagert sind. Die beiden andern, die in den Strudel, der durch das Rotieren der beiden ersten hervorgerufen wird, hineingerissen werden, bewegen sich in derselben Richtung, in der auch die Ionenkerne sich drehen. Dann ist aber die Richtung des Drehungssinnes, von den Kopfteilen der beiden Ionen gesehen, eine entgegengesetzte. Sieht man von dem Kopfteil des Kations auf die rotierenden H_2O-Molekeln und bewegen sich diese dann in negativem Sinne, also in der Uhrzeigerbewegung, so erscheinen sie vom Kopfteil des Anions in positivem Sinne. Nimmt man nun noch an, daß bei einem jeden Salz schon die beiden ersten H_2O-Molekeln, vom Kation aus betrachtet, sich in negativer Richtung bewegen, so sind für alle Ionen die Bewegungsrichtungen der rotierenden H_2O-Molekeln eindeutig festgelegt. Diese Bewegungsrichtungen müssen dann nach der Trennung beibehalten werden und dauernd erhalten bleiben, wenn auch die Ebenen der Rotationsbewegungen durch die wälzenden Bewegungen der Großmolekeln andere Richtungen erhalten.

Mancher Leser wird versucht sein, diese Annahmen als willkürlich hinzustellen. Aber diese oder ähnliche Annahmen müssen gemacht werden, wenn man das Aneinanderhaften der Ionen in einem Salze und den Austausch seines basischen Teils durch eine andere Base oder seines sauren Teils durch eine andere Säure begreifen will. Solange man die Anschauung aufrecht erhält, daß die Atome in ihren Verbindungen in ständiger Bewegung begriffen sind, wird man das Aneinanderlagern verschiedener Atome oder Atomkomplexe nur verstehen, wenn ihre Bewegung in demselben Sinne, also parallel zueinander erfolgen. Tritt daher in einem Salze an Stelle eines Metallatoms ein

anderes, so muß es dieselbe Bewegung ihrer Richtung nach ausführen wie dasjenige, dessen Platz es einnimmt, also dieselbe Schraubenbewegung haben; und anderseits müssen die Säureradikale unter sich und mit den Metallatomen gleiche Bewegungen ausführen, um das Aneinanderhaften dauernd möglich zu machen. Dann ist aber die hier aufgestellte Vorstellung meines Erachtens die einfachste, um den Zusammenhalt verständlich zu machen. Nach ihr bestimmt die Lage des Kopfteils des Ions zur Rotationsrichtung der H_2O-Molekeln im flüssigen Zustande und zur Rotationsrichtung der Ionenkerne um die Rotationsachse im festen Zustande den basischen oder sauren Zustand des Ions.

Nach dieser Anschauung könnte man erwarten, daß alle chemischen Verbindungen in Ionen zerspalten werden müßten. Denn in allen, den einfachsten wie den meist zusammengesetzten Körpern werden die Teile zusammengehalten; und der Zusammenhalt wird meist durch die dauernd gleiche Bewegung derselben zwei Atome oder Atomgruppen vermittelt. Durch Einwirkung auf diese beiden Partikeln müßten die H_2O-Molekeln durch ihre abgegebene Energie eine Lockerung des Zusammenhanges bis zum Zerfall bewirken. Aber man kann zwei Gründe anführen, die den Zerfall verhindern müssen. Einmal kann der Zusammenhang so fest sein, daß zu seiner Überwindung mehr Paare von H_2O-Molekeln nötig sind, als sich in der Fläche der rotierenden H_2O-Molekeln bewegen können. Und zweitens kann das am ersten abspaltbare Gebilde selbst Wasser bzw. das entsprechende Lösungsmittel sein. Dann setzt sich sofort neues H_2O an die Stelle des abgespaltenen und die alte Molekel ist neu ergänzt. Diesen Vorgang wird man wohl am ersten bei Körpern von Aldehydnatur und ähnlichen erwarten dürfen. Ein solcher ist Zucker; und daher ist es möglich, daß aus diesem Grunde Zucker bei der Auflösung in Wasser sich nicht zerspalten läßt. Dann würde sich dem Erkenntnisdrange die Frage vorlegen, ob andere Lösungsmittel aufzufinden sind, in denen Zucker einer Zerspaltung unterliegt. Auch andere Stoffe, wie z. B. Harnstoff, dürften unter diesem Gesichtspunkte geprüft werden.

28 Wie die Vorstellung der Großmolekel dem Vorgange der Ionenbildung eine neue Auffassung verleiht, so ist zu erwarten, daß der umgekehrte Vorgang der Salzbildung aus Ionen gleichfalls eine neue Beleuchtung erfährt. Solange den Ionen, an H_2O geknüpft, außer diesem Ionenwasser noch weitere Mengen Lösungswasser zur Verfügung stehen, solange bleibt die Lösung in unverändertem Zustande. Zwar tauschen die Ionen ihr Ionenwasser beständig mit dem Lösungswasser aus. Gibt ein Ion an der Oberfläche ein H_2O an die Luft ab, so nimmt es aus dem Lösungswasser sofort ein H_2O auf, allein infolge der Entwärmung, die das Ion beim Ausscheiden eines H_2O erleidet. Dieser Zustand bleibt erhalten, bis das Lösungswasser zu schwinden beginnt. Dann werden an der Oberfläche des Wassers Ionen ein H_2O abgeben, ohne gleich ein neues H_2O zu finden. Sie suchen sich mit einem anderen Ion in gleicher Lage zu vereinigen oder ihm oder einem vollständigen Ion ein H_2O zu entreißen. Beim volltsändigen Verschwinden des Lösungswassers bewegen sich dann dauernd Ionen mit 1 H_2O, die sich an ein anderes unvollständiges Ion anlagern können, so daß Ionenkomplexe entstehen. Aber diese Zusammenlagerung ist nur dann möglich, wenn zwei verschiedenartige Ionen einer Salzmolekel zusammentreten, wenn nämlich die Anlagerung nur an den sogenannten Flächenteilen vor sich gehen kann. Denn nur dann haben die an den Ionenkernen anhaftenden H_2O-Molekeln dieselbe Rotationsrichtung. Für den weiteren Prozeß sind mehrere Möglichkeiten vorhanden, um aus den flüssigen Salzmolekeln die feste zu gewinnen. Entweder werden aus dieser die beiden noch übrigen H_2O ausgestoßen, um den festen Kristall zu bilden;

oder es bleibt ein Teil des Ionenwassers zurück oder auch alles; ja, es bleibt sogar die Möglichkeit, wie gezeigt werden soll, daß der Kristall noch 2 H_2O-Molekeln mehr enthält als das Ionenwasser ausmacht. Der erste Fall ist beim NaCl anzutreffen. Ein Kochsalzkristall enthält kein Wasser. Um ihn zu bilden, legen sich ein Na-Ion mit 1 H_2O und ein Cl-Ion mit gleichfalls 1 H_2O zusammen und bilden dadurch den flüssigen Kristall. Beim Übergang zum festen Kristall werden auch diese beiden letzten H_2O abgestoßen. Der Kristall ist als der stabilste Zustand des Salzes anzusehen, also auch der, bei dem die größte Menge Energie abgegeben ist und der demnach die geringste Energiemenge be- und enthält. Die abgegebene Energie geht mit dem abgegebenen Wasser auf die unvollständigen Molekeln über, um sie vorübergehend wieder zu vollständigen Ionen zu machen.

Befinden sich in der Lösung Ca-Ionen und SO_4-Ionen, so enthält jedes Ion 4 H_2O-Molekeln. Nun gibt es zwei Kristallformen von $CaSO_4$, die des Anhydrits, das kein Kristallwasser enthält, und die des Gipses, das zwei H_2O an sich kettet. Bei der Anhydritbildung müssen von den 8 H_2O 6 abgegeben werden, um den flüssigen Kristall zu bilden, und darauf die beiden letzten, um den festen zu liefern. Die Gipsbildung kann auf zwei Wegen vorgestellt werden; entweder werden zunächst wieder 6 H_2O ausgestoßen, um den flüssigen Kristall zu liefern, und dann werden die noch übrigen zwei mit in den Kristall aufgenommen, um den festen Kristall zu formen. Man kann sich aber auch vorstellen, daß zunächst nur 4 H_2O ausgestoßen werden, um den flüssigen Kristall, und dann weitere 2 H_2O, um den festen zu gewinnen. Dann müßten zwei verschiedene Formen des flüssigen Kristalls vorhanden sein, die schon den kommenden festen Kristall prädestinierten. Dies ist nicht gerade als sehr wahrscheinlich anzusehen. Es wird sich auch bald zeigen, daß die Kristallform des Gipses für die erstere Annahme spricht.

Dann wird sich aus dem flüssigen Kristall $CaSO_4$ Anhydrit bilden, wenn diesem die letzten beiden H_2O von anderer Seite fortgerissen werden, wenn also in der Lösung schon viele unvollständige Ionen anderer Verbindungen herumschwimmen, die bereits Ionenwasser abgegeben haben, das sie zu ihrer eigenen Kristallbildung gebrauchen und das sie durch Heranziehung anderen Wassers, das bei der Bildung eines festen Kristalls leicht abgegeben wird, an sich binden. Unter ihrem Einflusse gibt der flüssige Kristall $CaSO_4$ das letzte Wasser ab und bildet Anhydrit. Gebraucht ein Salz das ganze Ionenwasser zu seiner Kristallbildung, so wird es von demselben möglichst gar nichts abgeben, oder, wenn es schon etwas abgegeben hat, dafür anderes wieder an sich anlagern. Will es dann aus seinem Ionenwasser den flüssigen Kristall bilden, so hat es aus der Lösung vorübergehend noch 2 H_2O aufzunehmen, die es beim Übergang zum festen Kristall wieder ausstößt. Aber es ist auch denkbar, daß der flüssige Kristall auch diese beiden H_2O in sein Gefüge aufnimmt, um den Festkristall herzustellen.

Nach dieser Auffassung ist das Kristallwasser im Grunde nichts anderes als Ionenwasser, und die Zahl der Kristallwassermolekeln darf eine gewisse Größe nicht überschreiten. Die Salze der einwertigen Metalle dürfen dann höchstens $4 + 2 = 6$, die zweiwertiger $8 + 2 = 10$, die dreiwertiger $12 + 2 = 14$, die vierwertiger $16 + 2 = 18$ enthalten. Mustert man die bekannten Salze auf ihr Kristallwasser durch, so bleibt bei den meisten das Kristallwasser hinter den angegebenen Maximalzahlen zurück. Nur bei den Natriumsalzen der zweiwertigen Säuren H_2SO_4 und H_2CO_3 trifft man die Maximalzahl 10; überschritten wird sie von keinem Salze. Diese letztere Tatsache darf als Stütze für die vorgetragene Ansicht angesehen werden.

29 Auch die Reihenfolge, in welcher aus einer Salzlösung verschiedener

Anionen und Kationen die Salze ausgeschieden werden, kann mit dem Ionenwasser in Zusammenhang gebracht werden. In dem Kampfe um das Ionenwasser werden diejenigen Ionen am ersten unterliegen, die zur Kristallbildung keines Kristallwassers bedürfen, da sie zu diesem Zwecke ja das Wasser des flüssigen Kristalls abstoßen. Und wenn ein Salz in zwei verschiedenen Formen, wie Anhydrit und Gips, mit mehr oder weniger Kristallwasser bestehen kann, wird die Form mit weniger Kristallwasser in diesem Falle die größere Wahrscheinlichkeit der Entstehung haben. Kann aber ein Salz nicht ohne eine bestimmte Menge Kristallwasser zur Ausbildung gelangen, so werden die erforderlichen Mengen Ionenwasser einfach zurückgehalten und können nicht von Salz-Ionen mit fehlender Kristallwassermenge entzogen werden. So ist es verständlich, daß von den Staßfurter Salzen sich zuerst NaCl und $CaSO_4$ als Anhydrit niedergeschlagen hat, und daß die, einmal dort ausgeschiedenen weiter gelagert haben, wenn auch Regen dem verdunstenden Salzmeere neue Wassermengen zugeführt hat. Diese Mengen wurden von den Salz-Ionen mit größerem Kristallwasserbedürfnis für sich in Anspruch genommen.

Hier ist auch der Ort, kurz die Bedeutung des Kristallwassers für die Erniedrigung des Gefrierpunktes in Salzlösungen hervorzuheben. Wird eine NaCl-Lösung zum Gefrieren gebracht, so werden aus den Ionen einer Molekel NaCl zusammen 4 H_2O ausgeschieden, die mit ihrer erniedrigten Temperatur den am Thermometer abgelesenen Gefrierpunkt herabdrücken. Bei der Bildung von $CuSO_4$ bleiben von den in Frage kommenden 8 H_2O 5 im Kristall, so daß nur 3 den Gefrierpunkt herabdrücken. Bei $FeSO_4$ kommt von den 8 H_2O nur 1 zur Geltung, um den Gefrierpunkt tiefer erscheinen zu lassen. Damit kann man zum Teil die starken Abweichungen begründen, welche nach Raoult die molekularen Gefrierpunktserniedrigungen der Salze untereinander und mit denen der Nichtelektrolyte bilden. Doch reicht der angeführte Grund nicht in allen Fällen aus, da sonst die molekulare Gefrierpunktserniedrigung von $FeSO_4$ (nach Raoult 18,4) kleiner sein müßte als die von $CuSO_4$ (18). Es scheinen dabei noch andere Faktoren mitzusprechen, wie die Ionisationswärme und die Temperatur, welche zur Salzabscheidung bei gegebener Konzentration gehört.

30 Schließlich kann man dem Ionenwasser auch einen Einfluß auf das Kristallsystem zuschreiben, in dem das Salz kristallisiert. Es ist nämlich ein Unterschied, ob die zum Kristall zusammentretenden Ionen das erforderliche Wasser an sich ziehen, wie es die bisherige Anschauung annimmt oder ob dieses Wasser bereits in den Ionen enthalten ist und der Kristall durch Ausstoßen überschüssigen Wassers gebildet wird. Im ersten Fall kann man ohne die hypothetischen Kohäsionskräfte gar nicht auskommen. Diese bestimmen die gegenseitige räumliche Lagerung der Atome der Kernmolekel, also die Gestalt des Kristalls; und die Molekeln Kristallwasser sind als Füllmasse anzusehen, die zwischen den Atomen eingelagert wird und demnach nur in zweiter Linie auf die räumliche Lagerung Einfluß hat. Im zweiten Fall kann man unter Zugrundelegung von Kohäsionskräften annehmen, daß die Richtung und Stärke dieser Kräfte durch die angelagerten H_2O schon beeinflußt sind, und zwar in dem Sinne, daß die Stärke nach den verschiedenen Richtungen mit dem Zurückbleiben größerer Mengen von Ionenwasser sich ausgleicht und die Hauptrichtungen mehr und mehr rechte Winkel bilden. Aber in diesem Fall kann man auch unter Verzicht auf Kohäsionskräfte eine Lagerung der Kristallteile annehmen, deren Ursache allein die abgegebene Energie ist, so daß die Kohäsion als Energiemangel anzusehen ist. Je weniger H_2O-Molekeln bei der Zusammenlegung der den Kristall bildenden

Ionen ausgestoßen werden, je weniger also der in den Ionen vorhandene Gleichgewichtszustand gestört wird, desto mehr bleiben die Teile des Einzelkristalls nach der Zusammenlagerung der Ionen nach allen Richtungen gleichmäßig orientiert; man darf daher erwarten, daß der Kristall dann im regulären System auftritt, wie es z. B. bei den Alaunen der Fall ist. An sich hat das Ion SO_4 die Neigung, mit Metall-Ionen Salze zu bilden, die nicht regulär sind. Aber bei den Alaunen, die von 32 H_2O der Ionen nur 8 abstoßen, dagegen 24 zurückhalten, findet man das reguläre System. Bei gerader Anzahl der zurückbleibenden H_2O wird die ursprüngliche Anordnung der kleinsten Teile in den Ionen nicht so sehr gestört wie bei ungerader. So kann man es verstehen, daß $NiSO_4 + 6\ H_2O$ dem quadratischen System angehört, während $NiSO_4 + 7\ H_2O$, obwohl es 1 H_2O mehr hat, rhombische Kristalle bildet. Und wenn $FeSO_4 + 7\,H_2O$ in monoklinen, $CuSO_4 + 5\,H_2O$ in triklinen Kristallen auftritt, so zeigt sich neben der ungeraden Anzahl der H_2O auch noch der Einfluß der absoluten Zahlengröße. Nun bildet $Na_2SO_4 + 10\,H_2O$ monokline Kristalle, obwohl hier kein Ionenwasser ausgetreten ist, sondern noch 2 H_2O hinzugetreten sind. Aber indem diese H_2O noch in den Bereich des Kristalles hineinbezogen sind, sind alle gleichmäßig gelagerten H_2O in ihrer Lage gestört worden; und man kann die Abweichung vom regulären System gerade auf dies Eindringen zurückführen. Ferner kristallisiert der vorhin erwähnte Anhydrit im rhombischen System, der Gips dagegen im monoklinen; die Aufnahme der beiden H_2O der flüssigen $CaSO_4$-Molekel in den Verband der Festmolekel hat eine Änderung der Gleichgewichtslage der einzelnen Teile bewirkt, die in der Änderung der Kristallform zum Ausdruck kommt.

31 Bisher sind nur die Lösungen in dem Lösungsmittel Wasser betrachtet worden; die Lösungen sind bis jetzt auch die einzigen, die genau durchforscht sind. Daneben gibt es nun eine Fülle von Lösungsmitteln, die einer besonderen Untersuchung bedürfen. Dahin gehört Alkohol, Äther, Schwefelkohlenstoff, Ammoniaklösung, Kohlensäure, Kalilauge, Zyankalium und andere. Diese bilden mit den gelösten Stoffen ebenfalls Großmolekeln, wie schon aus Raoults Versuchen zu schließen ist; und diese Großmolekeln können zum Teil unter der Beseitigung des überschüssigen Lösungsmittels als feste Substanz niedergeschlagen werden. Es ist auch nicht ausgeschlossen, daß diese Großmolekeln noch in einem anderen Lösungsmittel, z. B. im allgemeinsten, Wasser, sich lösen. Dann lassen bestimmte chemische Verbindungen noch eine andere Auffassung als die übliche zu. Es sind dies die Zinkate, Plumbite usw. und die komplexen Molekeln der Zyanverbindungen. Sie können alle als Großmolekeln betrachtet werden, die Zinkate und damit verwandten Verbindungen als Großmolekeln in dem Lösungsmittel KOH, die Zyanverbindungen als solche in dem Lösungsmittel KCy. Wie weit sich diese Auffassung halten läßt, vermag ich aus mangelnder Kenntnis der einschlägigen Literatur nicht zu sagen. Eine genaue Untersuchung dieser Frage hat nicht nur an sich Bedeutung, sondern dient auch zur Aufklärung, inwieweit das allgemeine Gesetz der Atomverkettung in den chemischen Verbindungen Gültigkeit hat. Die Zyanverbindungen unterliegen diesem Getze nicht mehr, wenn K und Ag als einwertig angesehen werden. Gibt man aber zwei Möglichkeiten der Bindung zu, einmal durch Atomverkettung und einmal durch reine Anlagerung von Molekel zu Molekel, so würde die Atomverkettung allgemeine Gültigkeit haben, wenn man in den scheinbaren Ausnahmefällen die Anlagerung von Molekeln mit ihrer Entwärmung als ausreichenden Grund ihres Zusammengeordnetseins nachweisen könnte. Die Schwierigkeit würde dann darin liegen, klarzulegen, daß das Kaliumatom im Kaliumsilber-

zyanid durch das Lösungsmittel H_2O abgetrennt wird, während das Silberatom an den Rest geknüpft bleibt. Wenn man aber berücksichtigt, daß die Ionisierung des Mol K eine Wärme von 63 000 cal frei macht, daß dagegen das Mol Ag zu seiner Ionisierung 26 000 cal aufnehmen muß, so kann man aus diesem Verhalten die Vermutung schöpfen, daß sich bei der komplexen Molekel aus AgCy und KCy die Ionenbildung auf das Abtrennen des K von dem übrigbleibenden Rest beschränken wird. Jedenfalls ist es bemerkenswert, daß in allen Fällen, auch bei den Zinkaten, Plumbiten usw. das in Frage kommende Kation K ist.

Nun kann man auch noch zu einer weiteren Vermutung kommen. Wenn nämlich die Bildung der Großmolekel ohne Zuhilfenahme von Kohäsionskräften allein durch Abgabe kinetischer Energie verstanden werden kann, so kommt von selbst die Frage, ob nicht auch die chemische Anlagerung allein durch Abgabe von kinetischer Energie ohne Zuhilfenahme von chemischen Affinitätskräften verstanden werden kann. Dann würden beide Annahmen dieser inneren Kräfte mit ihrer potentiellen Energie aus dem Rüstzeug ausgeschieden werden, mit dem die Wissenschaft das Verständnis der Naturerscheinungen zu erreichen sucht. Auf diesen Punkt komme ich im siebenten Abschnitt ausführlich zurück.

Es dürfte zweckmäßig sein, die beiden Wärmen, die durch ihre Abgabe auf die Zusammenlagerung von Atomen, Molekeln, Ionen bestimmend einwirken, durch kurze Bezeichnung zu unterscheiden. Die eine zeigt sich bei der Verkettung der Atome und Radikale zu Molekeln und kann daher Ankettungswärme genannt werden; die andere wird bei der Anlagerung von Molekeln zu Molekelkomplexen ausgeschieden und ist als Anlagerungswärme oder kurz Lagerwärme zu bezeichnen. Daneben ist noch als besondere Wärme diejenige zu erwähnen, die bei der Spaltung der Salze in Ionen durch Anlagerung von H_2O-Molekeln an die Ionenkerne bald abgegeben, bald aufgenommen wird und die daher sowohl positiv wie negativ sein kann. Für sie dürfte der Name „Spaltwärme" als geeignet erscheinen.

32 Zum Schluß mag noch der lange Streit, ob Wasser ein Elektrizitätsleiter ist, kurz gestreift werden. Er scheint durch die Untersuchungen von Kohlrausch in bejahendem Sinne entschieden zu sein. Aber da die nachgewiesene Zersetzung so gering ist, daß man sie auf nicht bemerkte Verunreinigungen zurückführen möchte, so begegnet die festgestellte Tatsache andauernd Zweifeln. Es soll nun hier der Versuch gemacht werden, die Nichtleitungsfähigkeit des Wassers zu begründen, indem der beobachtete schwache Strom auf einen besonderen Umstand zurückgeführt wird.

Die Atome, aus denen H_2O zusammengesetzt ist, können voneinander getrennt werden, wenn dazu eine hinreichend große Energie zur Verfügung steht. Nun gibt es zwei Möglichkeiten für die Zerspaltung von H_2O, entweder in drei Teile (H, H, O) oder in zwei Teile (H, OH). Da die zweite Zerspaltung weniger Energie verlangt, so ist diese am ersten zu erwarten, wenn sie überhaupt eintritt. Es fragt sich nun, ob bei normaler Temperatur in der Lösung so große Energien zur Verfügung stehen, daß eine Zerspaltung ohne Zuführung äußerer Energie möglich wird. Nun kommen wenigstens theoretisch auf Grund der Wahrscheinlichkeit in dem Wasser so große Geschwindigkeiten einzelner Molekeln vor, daß die in ihnen dadurch angehäufte Energie den Zerfall in H und OH bewirken kann. Diese H und OH sind, mit (+ e), bzw. (— e) behaftet, als Ionen anzusehen, gemäß der noch herrschenden Lehre. Ich nehme nun an, daß die H und OH sich mit je zwei H_2O zu Großmolekeln verbinden. Die hierbei abgegebene Energie kann mit zur Trennungsenergie von H_2O in seine Teile verwertet werden,

so daß die Zerspaltung bei einer geringeren momentanen Temperatur der Molekel vollzogen werden kann. Aus diesem Grunde wird die Wahrscheinlichkeit dieser Zerspaltung größer, wenn sie auch hinreichend klein bleibt. Es soll nun angenommen werden, daß eine auf Grund der Wahrscheinlichkeit angestellte Rechnung eine zwar sehr kleine, aber nicht verschwindend kleine Menge innerhalb einer bestimmten Zeit ergibt. Dann wird sich diese Menge vermehren und zwar anfangs mit der Zeit proportional. Ist diese Menge stärker angewachsen, so werden auch (H)- und (OH)-Ionen zusammenstoßen und können bei geeigneten Temperaturen die H_2O abschütteln und sich zu H_2O wieder vereinigen. Der Gleichgewichtszustand tritt ein, wenn die Menge der in der Zeiteinheit neugebildeten Großmolekeln (H) und (OH) ebenso groß ist wie die Menge der durch den Zusammenstoß wieder verschwindenden. Ist die Anzahl der in einer Sekunde entstehenden Großmolekeln sehr gering, so wird der Gleichgewichtszustand spät erreicht. Wann er erreicht wird, kommt für die vorliegende Frage nicht in Betracht, da er seit der Bildung des ersten Wassertropfens auf der Erde sicher erreicht ist. Man kann nun vermuten, daß der erreichte Gleichgewichtszustand solche Mengen von Großmolekeln geliefert hat, daß kleine chemische Wirkungen damit erklärt werden können.

Der ganzen Betrachtung kann eine Berechnung auf Grund der Wahrscheinlichkeit zur Seite gestellt werden; und wenn diese auch erhebliche Schwierigkeiten bieten wird, so ist sie doch sicher ausführbar. Diese Berechnung wird die Entscheidung bieten, welchen Wert die Darlegung hat. Sollten Rechnung und Beobachtung übereinstimmen, so würde der über diesen Punkt geführte Streit dahin entschieden werden, daß das Wasser ein absoluter Nichtleiter der Elektrizität ist, daß sich aber in jedem Wasser eine bestimmte kleine Anzahl von Ionen (H) und (OH) nach der alten Bezeichnung und Großmolekeln (H) und (OH) nach der neuen Bezeichnung vorfindet, welche die Elektrizität leiten. Die Ergebnisse von Kohlrauschs Versuchen sind dann nicht mehr zu bestreiten; ihre Deutung als Beweis für die Leitfähigkeit des Wassers wäre dagegen hinfällig.

3. Abschnitt.

Der galvanische Strom, eine kinetische Energie.

33 In den beiden vorangehenden Abschnitten habe ich das van't Hoffsche Gesetz über die Größe des osmotischen Druckes besprochen und aus ihm das Wesen dieses Druckes auf die Bildung von Großmolekeln zurückzuführen gesucht und gleichzeitig auch die Raoultschen Gesetze aus dem Verhalten der Großmolekeln erklärt. Ich habe dabei auf die Bildung von freier Energie bei der Großmolekelentstehung hingewiesen, deren Größe bei der Überführung von einem Mol H_2O aus dem freien in den gebundenen Zustand bei Normaltemperatur auf 1710 cal berechnet und aus den Zahlen von Pfaundler über die bei der Lösung von Wasser in Schwefelsäure abgegebenen Wärmemengen es wahrscheinlich gemacht, daß bei der Lösung von einer Molekel H_2SO_4, also bei ihrer Ionisierung 8 H_2O aufgewendet werden. Ich habe dann angenommen, daß jeder Valenz eines Ionenkerns 2 H_2O entsprechen, die sich an den Kern anlegen, um das Ion zu bilden.

Die bei dieser Ionisierung auftretende freie Energie halte ich für die Ursache des elektrischen Stromes der galvanischen Ketten. Damit setze ich mich in schroffen Gegensatz zu der bisherigen Auffassung, die die elektrischen Erscheinungen aus elektrischen Ladungen mit $+e$ und $-e$ ableiten

will. Ich nehme Stellung gegen die Anschauung von Helmholtz und die darauf fußende von Arrhenius und seinen Anhängern. Das wird um so auffälliger erscheinen, als diese seit den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts ihren Siegeszug über die ganze wissenschaftliche Welt angetreten zu haben glaubt. Man braucht nur die Worte nachzulesen, die Ostwald bei der Begrüßung der Elektrotechniker auf ihrer Versammlung 1894 in Magdeburg gesprochen hat. Er sagte:

„Das hundertjährige Problem der Voltaschen Kette ist soeben gelöst worden; wir sind jetzt imstande, auf Grund der Kenntnis weniger Konstanten die elektromotorische Kraft beliebiger Ketten mit einem hohen Grade der Annäherung vorauszuberechnen; und über die elektrische Leitfähigkeit der Elektrolyte besitzen wir sehr eingehende Kenntnisse. Zwar scheinen die jüngst gewonnenen Resultate noch nicht von allen Fachgenossen angenommen und anerkannt zu sein. Doch ist dies wohl mehr die Folge des auch in der intellektuellen Welt gültigen Trägheitsgesetzes oder Beharrungsvermögens; wenigstens sind Einwände gegen oben erwähnte Forschungsergebnisse in letzter Zeit nicht erhoben worden, und die Zahl der Überzeugten mehrt sich von Tag zu Tag. — Allerdings ist es keine geringe Zumutung an die wissenschaftliche Welt gewesen, die Anschauungen gutzuheißen, zu denen die elektrolytischen Arbeiten der letzten Jahre unabweislich geführt haben; handelt es sich doch um nichts weniger als eine völlige Umkehr aller gewohnten Vorstellungen über den Zustand der gelösten Stoffe; an Stelle beispielsweise des durch die stärksten Verwandtschaften zusammengehaltenen NaCl soll eine Lösung von Kochsalz freie Atome von Cl und Na enthalten. Welche Tatsachen machen eine derartige unerhörte Ansicht notwendig?"

Kann eine Siegeszuversicht selbstbewußter ausgesprochen werden, zumal wenn sie die Gegner der geistigen Trägheit beschuldigt? Nun, ich nehme diesen Vorwurf gern auf mich, wenn nur mein Streben Erfolg hat, an die Stelle der Hypothese der elektrischen Elementarquanten eine Erklärung der elektrischen Vorgänge auf rein mechanischem Wege zu setzen. Zu diesem Zweck will ich zuerst die Unhaltbarkeit der geltenden Anschauung nachweisen.

34 Diese knüpft an die Vorstellung von Grothuß an, der schon vor mehr als 100 Jahren die Zersetzung von Säuren und Salzen durch den elektrischen Strom zu erklären gesucht hat. Er geht aus von den schon vor ihm angenommenen elektrischen Fluida $+e$ und $-e$ mit ihren anziehenden und abstoßenden Kräften und nimmt an, daß die Zerfallprodukte eines Salzes infolge eines elektrischen Stromes schon in jeder Salzmolekel entgegengesetzte Elektrizitäten besitzen, deren Wirkungen nach außen sich aufheben. Wenn aber in einem Stromkreise ein positiver Strom an der Anode, ein negativer an der Kathode in die Flüssigkeit eintritt, so üben diese durch die ganze Flüssigkeit einen richtenden Einfluß aus, wodurch der elektronegative Bestandteil oder Anion nach der Anode, der elektropositive nach der Kathode gewendet wird. Indem nun das Anion einer unmittelbar an der Anode anliegenden Molekel sich an die Anode anlegt und dadurch neutral elektrisch wird, verbindet sich ihr Kation mit dem Anion der in der Richtung nach der Kathode liegenden Nachbarmolekel zu neutralem Salz; und so geht es durch die ganze Flüssigkeit bis zur Kathode, wo das Kation der letzten Molekel durch die negative Elektrizität der Kathode neutralisiert wird. Dieser Vorgang des Sichrichtens nach Anode und Kathode und der darauffolgenden Trennung und Neuvereinigung wiederholt sich so lange, als elektrischer Strom zugeführt wird.

Diese Erklärung ist den Erscheinungen in der damaligen Zeit in so weitgehendem Maße gerecht geworden, daß das Bedürfnis nach einer anderen gar nicht rege wurde. Auch das nachher von Faraday gefundene Gesetz über die Menge der Zerfallprodukte verschiedener Salze durch denselben Strom hat der Grothußschen Erklärung keinen Abbruch getan. Die dann folgende Zeit, in der das Gesetz von der Erhaltung der Energie zur allgemeinen Anerkennung kam, legte den Gedanken nahe, daß ebenso wie die lebendige Kraft und die Wärme als kinetische Energie nachgewiesen war, auch die elektrischen Erscheinungen in derselben Weise gedeutet werden könnten. Doch vermochte man damals nicht, auf diesem Wege die Polarität zu erklären und kehrte zu den elektrischen Ladungen zurück; und besonders war es Helmholtz, der die Vorstellung nach zwei Richtungen umgestaltete, indem er einmal Elementarquanten positiver und negativer Elektrizität einführte und anderseits, sich auf Clausius stützend, die Grothußsche Vorstellung etwas umgestaltete. Während dieser annahm, daß die beiden Ionen des Salzes auch in der Lösung miteinander dauernd zu einer Molekel vereinigt seien und nur im Augenblicke der Umlagerung voneinander getrennt würden, nahm Helmholtz an, daß die Salze, soweit sie der elektrolytischen Zersetzung unterliegen, schon in der Lösung in ihre Ionen gespalten sind und, mit ihren Elementarquanten beladen, darin frei umherschwimmen. Zu dieser Ansicht führte ihn die von ihm festgestellte Tatsache, daß schon der schwächste elektrische Strom imstande ist, elektrolytische Arbeit zu leisten, während die Grothußsche Vorstellung bereits eine gewisse Stärke des elektrischen Stromes voraussetzte, ehe überhaupt eine Wirkung zu beobachten war. Auf der Grundlage der Helmholtzschen Anschauung hat sich, besonders unter dem Einfluß von Arrhenius, die jetzige Lehre von den Vorgängen in der elektrolytischen Zelle gebildet.

Diese Vorstellung von Helmholtz bietet aber unüberwindliche Widersprüche, die hier hervorgehoben werden sollen. Die elektrischen Elementarquanten sind alle unter sich gleich groß; doch sind die positiven von den negativen ganz verschieden in *der* Art, daß sich die gleichartigen Quanten abstoßen, die ungleichartigen sich anziehen, und daß gleiche Quanten entgegengesetzter Art, in einer Molekel zusammengelagert, nach außen gar keine Wirkung ausüben, so daß die Molekel unelektrisch wird. Die erste Frage ist die: wie soll man sich diese Quanten vorstellen? etwa als Materie, nur daß sie sich von der Materie durch deren wichtigste Eigenschaft unterscheiden, daß auf sie die Gravitation nicht einwirkt. Und dabei sollen die Quanten sonst aufeinander einwirken wie die Materie, daß sich nämlich entgegengesetzte Quanten nach demselben Gesetze anziehen wie die — gleichwertigen — Massen der Materie. Für die Materie wird die Unzerstörbarkeit angenommen, ebenso wie, daß keine neue Materie erzeugt werden kann. Dasselbe scheint Helmholtz auch von den Elementarquanten anzunehmen. Aber dann sind die elektrischen Influenzwirkungen nicht zu begreifen, da aus demselben Leiter theoretisch unendlich oft ein positives und ein negatives Elementarquantum entfernt werden kann, ohne daß jemals ein Erlöschen der Wirkung eintritt. Aber wenn diese Quanten Massen sind, wie soll dann erklärt werden, daß sie, diese Massen an sich, ohne aufgespeicherte Energie Arbeit leisten können? Bisher ist eine solche Erklärung gar nicht versucht worden; es ist aber gar nicht möglich, an ihr vorbeizugehen. Überflüssig würde sie nur, wenn die Quanten keine Materie, sondern Energien wären. Aber Energien sind ihrer Natur nach positive Größen; dann müßte ein positives und ein negatives Quantum zusammen eine erhöhte Energie geben. Aber nach Helmholtz soll die Vereinigung beider in

einer Molekel diese arbeitsunfähig machen, während die positiven und negativen für sich, getrennt, arbeitsfähig sind. Um dieses Bedenken zu heben, könnte man annehmen, daß das eine Quantum, das positive, einen Energievorrat, das andere, das negative, einen ebensogroßen Energiemangel hätte. Man müßte dann auf diesem Wege negative Energien einführen, die aber vorstellungswidrig sind. Mit ihnen könnte man dann vielleicht verständlich machen, daß zwei positive Quanten auf Grund ihres Energievorrates sich abstoßen könnten. Wie dann aber zwei negative Quanten sich auch abstoßen können, ist völlig unfaßbar. Ebenso dürfte es schwierig sein, die Anziehung zwischen positiven und negativen Quanten zu begreifen. Man könnte nun der Einführung negativer Energien noch dadurch ausweichen, daß man an sich nur positive Energien zuläßt, aber eine bestimmte positive Energie als Nullenergie einführt, wie bei der Wärme 0° C angenommen ist. Dann könnte als Nullenergie diejenige festgestellt werden, die auf der Erde allen, im Energiegleichgewicht befindlichen Körpern zukommt, und daß bei Störung des Gleichgewichts an der einen Stelle ein Überschuß und an der anderen Stelle ein ebensogroßer Mangel aufträte, ohne daß die letztere dabei jeder Energie bar wäre. Aber da der positiven Ladung immer eine negative Ladung von gleicher Größe entspricht und anderseits in unseren Elektrizitätswerken elektrische Energien von sehr bedeutender Stärke erzeugt werden, so muß auch der positiven Elektrizität von hoher Intensität eine negative von gleicher Intensität entsprechen. Wenn dann aber jede negative elektrische Energie, absolut genommen, einen positiven Sinn haben soll, dann muß der Nullenergie auf der Erde eine Energie von sehr beträchtlicher Größe entsprechen. Diese Folgerung wird aber in keiner Weise durch Tatsachen unterstützt; und demnach ist auch die ganze Hypothese einer solchen Nullenergie zurückzuweisen. Außerdem ist noch darauf hinzuweisen, daß die Erde kosmischen Einflüssen, besonders der Sonne, unterliegt und daß infolgedessen der elektrische Zustand der Erde Schwankungen unterworfen ist. Dann würde die Durchschnittsenergie, die dem Gleichgewichtszustande auf der Erde entspricht, gleichfalls schwanken; und die Elementarquanten selbst könnten keine unabänderlichen Größen mehr sein, sondern solche, deren Energie sich von Jahr zu Jahr ändern könnte. Dann würde aber die Helmholtzsche Vorstellung von der Unveränderlichkeit der Elementarquanten in ihrer Grundlage erschüttert werden.

36 Im Folgenden sollen nur die Lösungen nach der Auffassung von Helmholtz, Arrhenius und ihren Anhängern besprochen werden. Wenn z. B. NaCl in Wasser gelöst wird, sollen die Ionen Na und Cl bei hinreichender Verdünnung der Lösung in Wasser isoliert schwimmen, wobei Na mit $+e$ und Cl mit $-e$ geladen sein soll; und dabei hat nicht die Zufuhr elektrischer Energie diese Trennung besorgt, sondern sie kommt von selbst, obwohl sich die entgegengesetzten Elektrizitäten anziehen sollen und demnach eine Arbeitsleistung die Trennung besorgen muß. Wo ist nun das Äquivalent für diese Trennungsarbeit? Da diese Energie nicht zugeführt wird, muß sie der Lösung entnommen werden. Aber bei der Mischung konzentrierter Kochsalzlösung mit Wasser wird keine Temperaturverminderung beobachtet. Vielmehr ist, von einem anderen Gesichtspunkte betrachtet, eine kleine Temperaturerhöhung zu erwarten; denn die Lösung mit Ionen muß als der stabilere Zustand angesehen werden, dessen Bildung, wenn sie von selbst geschieht, mit einer Wärmeabgabe verknüpft sein muß.

Nun sind Na und Cl beide im Atomzustande. Alle chemischen Erfahrungen weisen darauf hin, daß die Elemente dann besonders chemisch wirksam sind und daher besondere Leistungen zeigen; und jetzt sollen sie grade

wirkungslos sein, obwohl sie doch das Salz zurückbilden könnten und müßten. Aber sie wirken nicht nur aufeinander nicht ein, sondern auch nicht auf die etwa eingeführten Elektroden, solange kein Strom durch sie geleitet wird. Sie wirken auch nicht auf das Wasser ein, obwohl Natrium schon im Molekularverband das Wasser zersetzt. Die gasförmigen Cl-Ionen treten nicht aus der Lösung heraus und wirken auch nicht auf etwa eingeführtes gefärbtes Zeug. Alle diese Tatsachen drängen zu dem Gedanken, daß das Wasser nicht nur Anlaß der Molekelspaltung in Ionen ist, sondern unmittelbar an der Ionenbildung beteiligt, in den Ionen mitenthalten ist.

Der Einwand, daß die zwischen den Ionen liegenden Wassermolekeln die Wiedervereinigung verhinderten, ist hinfällig; denn bei der großen Beweglichkeit der Wasserteilchen gegeneinander müssen die Zusammenstöße zwischen den isolierten Na und Cl sehr häufig erfolgen. Man müßte denn schon die besondere Annahme machen, daß mit Elektrizität geladene Metallatome wirkungslos, dagegen ungeladene wirkungsvoll sind. Dann würden die Elementarquanten als energievermindernd anzusehen sein. Damit würde aber alles auf den Kopf gestellt werden, da die Ladungen grade die elektrischen Wirkungen erklären sollen.

Führt man nun dieser Lösung elektrische Energie zu, so sollen die elektrisch geladenen Anionen an der Anode, die Kationen an der Kathode neutralisiert werden; und diese neutralen, nach außen unwirksamen Atome bzw. Radikale sollen plötzlich befähigt sein, sehr bedeutende chemische Wirkungen mit starker Wärmeabgabe hervorzubringen, während sie es in ihrem wirksamen Zustande nicht vermochten. Jetzt greift Cl das Zink der Anode an und ebenso Na das Wasser in der Nähe der Kathode, um NaOH und H zu bilden, wobei das eben erst neutral gemachte Na wieder elektropositiv werden muß, um sich mit dem elektronegativen OH zu verbinden. Zu diesem Zweck muß das positive Elementarquantum von (+ H) des Wassers auf Na hinübersteigen. Nun sind aber Na und (+ H) frei beweglich; daher müssen sich doch gewisse (+ H) aus dem Bereiche des Na entfernen können, ehe das + e von H auf Na übergesprungen ist. Denn ganz ohne Zeit kann sich der Vorgang nicht abspielen, ebensowenig wie ohne Arbeit. Denn Helmholtz nimmt an anderer Stelle an, daß Zn das + e stärker festhält, als Cu und erklärt daraus das verschiedene chemische Verhalten beider. Dann müßte aber ein Teil von Na unelektrisch und ein Teil von H als elektropositiv in der Lösung erhalten bleiben. Dann könnten aber die durch primäre und sekundäre Wirkungen ausgeschiedenen Bestandteile nicht mehr ihren Atom- bzw. Molekulargewichten proportional sein. Auch das Überspringen des + e von einem Atom zum andern, obgleich Atom und Elementarquantum fest miteinander verbunden sind, ist nicht so leicht zu verstehen. Na muß dann ein + e begieriger anziehen, als H es vermag. Dann hätte die Wissenschaft es fertiggebracht, neben der Wahlverwandtschaft der Elemente untereinander noch diejenige der Elemente zu den Elementarquanten einzuführen, während doch jedes wissenschaftliche Bemühen dahin gehen muß, die allzu menschliche Vorstellung der Affinität einzuschränken oder ganz zu beseitigen.

37 Die Schwierigkeiten mehren sich noch. Bestimmte Untersuchungen haben festgestellt, daß die Ionen bald mehr, bald weniger Energie enthalten, als die ungeladenen Atome bzw. Radikale. So gibt Zn bei dem Übergang in den Ionenzustand pro Valenzeinheit 16300 cal ab, Cu nimmt dagegen pro Valenzeinheit 8765 cal auf. Danach sind die Elementarquanten sicher als Energien aufzufassen. Es fragt sich nun, ob sie als kinetisch oder als potentiell anzusehen sind. Kinetische Energien haben die Eigenschaft, daß, wenn

sie sich auf zwei Trägern befinden, die zusammenstoßen und zusammenbleiben, sich gegenseitig ausgleichen. Sind daher die Elementarquanten als kinetische Energien anzusehen, so muß die Vereinigung von Zn und + e zu einem Ausgleich der Energien führen. Da aber Zn, mit + e vereinigt, weniger Energie enthält, als Zn allein, so müßte + e negative Energie enthalten, was schon vorher abgelehnt wurde. Ferner ist diese Energie auch nicht verschwunden, sondern als Wärme auf die Lösung übergegangen. Man muß also annehmen, daß + e keine Energie darstellt, sondern nur Träger der Eigenschaft ist, durch Anlagerung an Zn aus diesem Energie auszutreiben. Diese letztere kann nur frei sein: d. h. eine solche, die an einer Stelle im Überfluß im Vergleich zu der Energie der Nachbarstellen vorhanden ist. Dann müßte Zn im Metallzustande immer freie Energie besitzen, so daß es unverständlich ist, weshalb sie dann nicht sofort an die Umgebung abfließt. Cu nimmt dagegen mit der Ladung + e pro Valenzeinheit 8765 cal auf. Dasselbe + e soll also die Fähigkeit haben, bei dem einen Metall eine Verminderung, bei dem anderen eine Vermehrung der kinetischen Energie des Metalles hervorzurufen; und es wird nicht der geringste Versuch gemacht, dies merkwürdige Verhalten zu erklären.

Daß + e keine kinetische Energie ist, dafür spricht auch die folgende Überlegung. Nach der Clausiusschen Vorstellung sind die Molekeln und Ionen einer Lösung in ständiger Bewegung und die Geschwindigkeit eines jeden Teiles ändert sich nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit von 0 bis ∞. Infolgedessen muß ein Zn-Ion im Laufe der Zeit sicher einmal eine solche Energie erhalten, daß es neutral elektrisch wird. Wenn es in diesem Zustand ist, so ist es nach der allgemeinen Ansicht in der stabilsten Lage. Man sollte daher erwarten, daß es unelektrisch geworden sei und auch bleiben müsse. Das ist aber nicht der Fall, da es dann aus der Lösung herausfallen würde. Und ebenso wird ein geladenes Cu-Ion mit vermehrtem Energieinhalt die kinetische Energie seiner Bewegung einmal soweit herabdrücken können, daß es neutral elektrisch wird. In diesem Falle sollte man erst recht erwarten, daß Cu aus der Lösung herausfiele.

Nun bleibt noch übrig, + e als potentielle Energie aufzufassen; und das ist um so bequemer, als man von dieser keine Vorstellung hat und alles darunter verstehen kann. Man könnte dann annehmen, daß sie anderen Gesetzen als die kinetische unterliege, und daß sie auf einem Träger neben der kinetischen und unabhängig von ihr in ihrer ganzen Größe unveränderlich bleiben könne, während die kinetische um ihren Mittelwert nach beiden Seiten schwanke. Da aber erfahrungsgemäß potentielle Energie in kinetische übergeht und umgekehrt, — dies ist ja der Inhalt vom Gesetz der Erhaltung der Energie — so müßte derjenige, der diesen Einwand erhöbe, begründen, weshalb im vorliegenden Falle kein Übergang von potentieller Energie in kinetische und umgekehrt vor sich geht. Außerdem müßte er verständlich machen, wie + e bald eine Vermehrung, bald eine Verminderung der Energie des Elementes veranlaßt.

Bei diesen letzten Betrachtungen ist immer nur von + e-Ladungen gesprochen worden. Aber daneben bestehen nach Helmholtz noch die negativen Ladungen. Wenn nun schon die positiven Ladungen auf positive und negative Energien führen, wenn die letzteren existieren könnten, so steht man der Deutung der negativen Ladungen erst recht ratlos gegenüber. Solange die Anhänger von Helmholtz für diese keine annehmbaren Vorstellungen liefern, so lange schwebt die ganze Annahme in der Luft. Helmholtz geht über die Beschreibung der Erscheinungen durch die Aufstellung seiner

Hypothese weit hinaus: er will mit ihr die Erscheinungen erklären. Daß er dies nicht vermocht hat, glaube ich, gezeigt zu haben.

38 Daher drängt sich die Frage auf, ob Helmholtz' Annahme für die Wissenschaft förderlich gewesen ist oder nicht. Als er seine 1881 in London gehaltene Faraday-Gedächtnisrede veröffentlichte, erwartete die Wissenschaft aus einer ganz anderen Richtung die Erklärung der elektrischen Erscheinungen. Man hatte unter dem Einfluß des 30 Jahre vorher geprägten Satzes von der Erhaltung der Energie gehofft, die Elektrizität ebenso wie die Wärme als kinetische Energie erfassen zu können, als eine Größe, die durch Masse und Geschwindigkeit bestimmt ist, wo die Masse keine andere ist als die, an der die Wärme haftet. Man hatte gehofft, daß der Dualismus in den elektrischen Erscheinungen, der bis dahin auf den Dualismus der beiden Elektrizitätsarten begründet war, auf zwei entgegengesetzte Bewegungen zurückgeführt werden könnte. Und man hatte bei der alle weit überragenden Bedeutung von Helmholtz erwartet, daß er uns die Erlösung von den bisherigen Vorstellungen bringen würde. Statt dessen verkündete er in England die Lehre von den Elementarquanten + e und — e und fügte in den neuen Bau der auf die Energielehre begründeten Wissenschaft zu den etwa 80 Elementen der bekannten Materie noch zwei neue Elemente, denen ungeahnte Wirkungen zugeschrieben wurden. Sie vereinigten sich mit allen alten Elementen, um etwas ganz Neues zu bilden. Mit vielen Elementen verband sich nur + e, mit vielen anderen nur — e, mit manchen aber beide. Während die alten Elemente ponderabel waren, waren es die neuen nicht. Während jene sich untereinander addierten, wie die positiven Zahlen, addierten sich diese untereinander wie positive und negative Zahlen; und mit den alten Massen addierten sie sich so, wie sich weder positive noch negative Zahlen addieren, sondern so, daß etwas ganz Neues herauskam, als wenn diese Zahlen nach der Beschaffenheit der Elemente veränderlich wären. Ich kann mich noch lebhaft der Enttäuschung erinnern, die die Verbreitung dieser Rede in Deutschland hervorrief. Anstatt aus dem Munde des hochverehrten Mitbegründers der Lehre von der Erhaltung der Energie einen neuen gewaltigen Fortschritt zu vernehmen, las man etwas, das die alten Vorstellungen über Elektrizität konservierte und das man bei aller Hochachtung für den greisen Forscher nicht ganz von Rückschritt freisprechen konnte. Viel mag der Einfluß des ihm befreundeten Thomson beigetragen haben, der durch die Rauchringe seines Freundes Tait zu der Vorstellung gebracht wurde, die Materie als Knotenpunkte von Wirbelbewegungen aufzufassen, so daß die Materie nicht mehr die Grundlage bildete, auf der sich die Welt aufbaute. Dadurch wird es verständlich, daß die neuen Massen + e und — e ohne erhebliche Bedenken eingeführt wurden; denn wenn sie doch in Wirbelbewegungen ihre Grundlage hatten, konnten sie gewichtslos sein. Dann hatte man nur die Aufgabe, das Gewicht der anderen Massen zu erklären, eine Aufgabe, die allerdings nicht gelöst wurde. Auch ist hervorzuheben, daß Helmholtz noch ein überzeugter Anhänger der Fernwirkung der Gravitation war, also allen Versuchen, diese mechanisch zu erklären, fremd gegenüberstand und so den Massen eine magische Kraft zuschrieb. Ferner darf darauf hingewiesen werden, daß zwar der Begriff der kinetischen Energie auf einer klaren Vorstellung beruhte, der der potentiellen Energie jeder Vorstellung entbehrte, also die ganze Energievorstellung keine ganz klare war. Schließlich zeigte Helmholtz auch in seinen späteren Jahren eine gewisse Gleichgültigkeit gegenüber einer scharfen Vorstellung; denn er gehörte zu denjenigen, die der mathematischen Berechnung eine zu überwiegende Bedeutung beilegen. Diese ist zwar imstande, bei einer bestimmten richtigen Vorstellung

alle Folgerungen aus ihr richtig zu ziehen; sie kann auch bei einer unrichtigen Vorstellung aus den Folgerungen die Verkehrtheit ableiten; aber sie ist nicht fähig, allein eine richtige Vorstellung in der Physik zu liefern.

39 Es genügt nun nicht, zu zeigen, daß Helmholtz und seine Anhänger von ihrer Grundvorstellung aus keine widerspruchsfreie Erklärung geliefert haben; es muß auch der positive Nachweis erbracht werden, daß die Entstehung der Ionen als Großmolekeln zu einem ausreichenden Verständnis führt. Nun ist das Ion Na nach Helmholtz mit + e geladen, in der Lösung aber, wie schon erwähnt wurde, wider Erwarten wirkungslos, dagegen das neutrale Atom Na stark chemisch wirksam. Ist aber das Ion Na eine Großmolekel, bestehend aus dem Atom Na und 2 H_2O, so enthält diese Großmolekel eine bestimmte Energiemenge weniger als die Bestandteile, wenn sie voneinander getrennt sind, zusammen. Es bedarf daher einer Energiezufuhr, um Na wieder zu einem isolierten Atom zu machen; und solange diese nicht zugeführt ist, ist das Ion Na um sie wirkungsloser als das neutrale Na. Das Ion als Großmolekel Na verhält sich zu dem neutralen Na nach dieser Auffassung genau so wie die Wirklichkeit zeigt. Daher erklärt in diesem besonderen, aber recht wichtigen Falle die Großmolekelvorstellung die Tatsachen besser als die alte Auffassung. Ferner wenn man irgend eine Arbeitsleistung erklären will, so hat man nach der freien Energie zu suchen, die aus ihrem Abströmen nach der Arbeitsstelle diese Arbeit ermöglicht. In bezug auf den elektrischen Strom weist die neue Auffassung auf die freie Energie hin, die bei der Bildung der Großmolekeln erwächst. Die Lehre von Helmholtz übergeht die Beantwortung dieser Frage; sie schiebt offensichtlich die Arbeitsleistung den Elementarquanten zu; doch liegt darin keine Erklärung, ebensowenig wie die Fernwirkung der Massen dadurch zu erklären versucht wird, daß sie eine Eigenschaft der Massen sein soll. Seine Nachfolger machen den osmotischen Druck dafür verantwortlich, lassen es dabei aber unklar, wer es bewirkt, daß dieser Druck längs eines bestimmten Weges Arbeit leistet. Auch ist hervorzuheben, daß der osmotische Druck nur unter sehr beschränkten Bedingungen entsteht und zur Arbeitsleistung kommt, wenn nämlich eine Lösung mit noch ungelöstem Salz und das reine Lösungsmittel, nur durch eine durchlässige Membran voneinander getrennt, in Berührung kommen und nur so lange, als noch festes Salz gelöst wird, und wenn dabei die entwickelte freie Energie an ihrer Entwicklungsstelle auf einen ihr entgegentretenden Widerstand stößt, den sie überwinden kann. Diese Bedingungen werden aber dort, wo elektrische Arbeit geleistet wird, fast nie erfüllt.

Schon diese kurze Betrachtung zeigt, daß die neue Auffassung der bisherigen in wesentlichen Punkten überlegen ist. Weitere Tatsachen nach dieser Richtung anzuführen, hat keinen besonderen Zweck; denn sie alle würden den einen der Erklärung anhaftenden Mangel nicht beheben, den auch die Helmholtzsche Hypothese besitzt, daß sie nicht den Mechanismus aufdeckt, der von der Ursache zur Wirkung führt; der also die Bewegungsvorgänge klarlegt, als deren Folge die elektrische Arbeit anzusehen ist. Wenn daher die elektrische Energie als kinetisch anzusehen ist, so fragt sich, wie man sich diese vorzustellen hat.

40 Es gibt nur vier Hauptformen, in denen die kinetische Energie auftritt. Denn entweder haftet die Energie dauernd an dem selben Träger oder sie geht von Träger zu Träger. Ferner bleibt der Träger entweder dauernd an derselben Stelle oder, genauer ausgedrückt, behält dieselben Träger dauernd als Nachbarn oder er ändert dauernd seine Nachbarschaften. Es gibt daher:

1. ruhende Träger, an denen die Energie dauernd haftet wie bei der Wärme;
2. ruhende Träger, in denen die Energie von Träger zu Träger geht, wie beim Stoß;
3. sich bewegende Träger, an denen die Energie dauernd haftet, wie bei der abgeschossenen Kugel;
4. sich bewegende Träger, bei denen die Energie von einem Träger auf den anderen übergeht, wie bei den Flüssigkeiten, Gasen, Elektronen, bei denen die Träger in ständiger Bewegung sind und durch ihre Zusammenstöße Energie teilweise auf andere übertragen oder von anderen aufnehmen.

Wenn die elektrische Energie als kinetisch aufgefaßt werden soll, muß sie in der zweiten Form auftreten. Denn die Träger der Energie ruhen, während die Energie sich bewegt; und zur Veranschaulichung wird man auf den Stoß zurückgehen.

Ferner ist jede Bewegung entweder nur fortschreitend oder nur drehend oder beides zugleich, also Schraubenbewegung. Nur bei der Wärme fehlt im wesentlichen die fortschreitende Bewegung; die übrigen drei Energieformen zeigen Schraubenbewegungen, demnach ist auch die elektrische Energie Schraubenenergie.

Jede Schraubenenergie, also auch die elektrische, setzt sich aus zwei Energien zusammen, der translatorischen Energie Et, oder Längswucht, und der rotatorischen Er, oder Drehwucht. Beide sind durch Addition zu verknüpfen, um die Gesamtenergie zu ergeben. $E = Et + Er$. Bei den Gasen ändern sich infolge der Zusammenstöße der Träger die Energiemengen auf den einzelnen Trägern, während die Gesamtenergie der gegebenen Gasmenge unverändert bleibt. Dabei ändert sich sowohl die Längswucht wie die Drehwucht des einzelnen Trägers; aber die Schwankungen der ersten sind wesentlich größer als die der letzteren, da deren Änderung langsamer erfolgt, also auch vom Mittelwert weniger stark abweichen kann. Denn diese Änderungen gleichen fich durch die neuen Stöße im Laufe der Zeit wieder aus. Je langsamer daher diese bei der Drehwucht erfolgen, sei es als Zu- oder Abnahme, um so leichter werden sie durch eine entgegengesetzte wieder aufgehoben: Man kann daher für viele Betrachtungen diese Schwankungen vernachlässigen und die Änderungen als auf die Längswucht beschränkt ansehen, was in der Lehre der Gasbewegungen allgemein geschieht. Bei den Gasen ist auch die Drehwucht kleiner als die Längswucht anzusehen. Bei der elektrischen Energie dürfte das Verhältnis zwischen beiden innerhalb viel weiterer Grenzen liegen. Es kann die Längswucht gegen die Drehwucht verschwindend klein sein wie beim Magnetismus; und es kann bei Strömen höchster elektrischer Spannung, d. h. höchster Geschwindigkeit, die Längswucht die Drehwucht stark übersteigen.

41 Wie schon gesagt, ist die Übertragung der elektrischen Energie am besten mit dem Stoße zu vergleichen, mit dem elastischen Stoß, wenn dabei keine Energie in Form von Wärme übergeführt wird, und mit dem unelastischen, wenn diese Überführung erfolgt. Da erfahrungsmäßig immer eine Umwandlung in Wärme stattfindet, so ist der unelastische Stoß heranzuziehen. Da aber anderseits in Metallen die Wärmeabgabe bei Übertragung von Energie mit großer Längswucht sehr gering ist, so ist in diesem Fall der Vorgang jedenfalls dem elastischen Stoße sehr ähnlich. Welches ist nun beim elastischen Stoß die in Frage kommende Masse? Wenn eine Reihe gleicher elastischer Kugeln miteinander in Berührung sind und gegen die erste dieser frei aufgehängten Kugeln in der Richtung der Kugelreihe eine gleichgroße

Kugel mit bestimmter Energiegröße stößt, so wird diese von Kugel zu Kugel durch die ganze Reihe hindurch geleitet; und nur die letzte behält die Energie, durch welche sie etwa ebenso weit und hoch fortgetrieben wird, als die stoßende Kugel weit und tief bewegt war. Die Energie ist restlos fortgetragen und kann daher an der neuen Stelle eine Arbeit leisten. Dann verschwindet sie an der letzten Kugel als lebendige Kraft; und wenn an der ersten Stelle neue Stöße ausgeübt werden, so wird die Übertragung der Energie nach der neuen Stelle und die dortige Umformung fortwährend vor sich gehen. Man kann dann von einem Fließen der Energie durch die Kugelkette sprechen. Auch wenn die Kugeln nicht gleichmäßig groß sind, so ändert dies an der Übertragung der Energie nichts. Hat die stoßende Kugel eine kleinere Masse als die aufeinanderfolgenden der Kugelkette, so bleibt zwar die Möglichkeit, daß sie die erste Kugel nur um eine Geringes verschiebt, selbst aber etwas zurückprallt; aber die aufeinanderfolgenden Stöße neuer Kugeln werden das Zurückprallen aufheben und die Energie bald gleichmäßig übermitteln; man kann wohl von einem zeitweiligen Übergangswiderstande zwischen der kleinen und den großen Kugeln sprechen. Sind aber in einem Leiter die einzelnen Träger der Bewegung, die Atome bzw. Molekeln, so fest zueinander geordnet, daß sie nur um ihre Bewegungsmittelpunkte schwingen können, ohne daß diese sich verschieben, dann kann von einem Übergangswiderstande nicht die Rede sein; die Übertragung ist eine unmittelbare, die Geschwindigkeit der übertragenen Energie ist überall dieselbe. Ändert sich dagegen die Masse der einzelnen Träger wie beim Übergang von einem Metall zum anderen, so ändert sich auch die Geschwindigkeit, d. h. die Geschwindigkeit, mit welcher das letzte Massenteilchen der bisherigen Metallkette behaftet war oder die Geschwindigkeit in der Formel $\frac{1}{2} mv^2$ der elektrischen Energie. Diese fällt nicht zusammen mit der Geschwindigkeit, mit der sich die Energie durch den ganzen Leiter bewegt. Denn diese ist auch abhängig von dem Abstande der Atome im Leiter, von deren Schwingungszustande, ob Atome oder Atomkonglomerate selbständig schwingen, ob diese letzteren unter sich ein festes Gestell bilden oder teilweise gegeneinander verschiebbare Teile enthalten, und schließlich von der Frage, ob durch die räumliche Ausdehnung der Atome die Geschwindigkeit der Energieübertragung beschleunigt oder verzögert wird.

Beim Stoß, der durch eine Reihe von Kugeln geht, sind nicht sämtliche Kugeln als die Masse anzusehen, an der die Energie haftet, sondern nur e i n e, da die Energie in jedem Augenblick nur an e i n e r Kugel haftet. Ebenso wenn mehrere Kugelreihen nebeneinander verwertet werden, um Energie zu übertragen, so ist aus jeder Kugelreihe nur e i n e Kugel auszuwählen, die als Masse zu rechnen ist. Legt man daher senkrecht zu den nebeneinanderliegenden Kugelreihen zwei Querschnitte im Abstande des Durchmessers einer Kugel, so werden die von den beiden Querschnitten eingeschlossenen Kugelmassen das in Frage kommende m ausmachen. Oder bezeichnet man die hintereinander geordneten Kugeln einer Reihe als einen Kugelfaden, so ist m der Anzahl dieser Fädenproportional und ist — bei Gleichheit aller Kugeln — das Produkt aus einer Kugel mit der Anzahl der Fäden. Dasselbe gilt von der elektrischen Energie. Man darf daher bei einem elektrischen Strome, der durch einen Draht geht, das m als die Anzahl der Stromfäden, multipliziert mit der Masse eines Atoms dieses Drahtes, bezeichnen. Dann ergibt sich als Maximum für m die Masse der Atome auf einem Querschnitt oder genau in dem Zwischenraume zweier Querschnitte, die um den Abstand zweier Atome, von Mitte zu Mitte gerechnet, voneinander abstehen. Aber dieses Maximum wird nicht von jedem Strom erreicht; son-

dern dieser kann viel weniger Stromfäden in Anspruch nehmen. Die Anzahl derselben hängt ab von der Größe der freien Energie, die an einer bestimmten Stelle dauernd erzeugt wird, und von der Arbeit, die in jedem Stromfaden geleistet werden muß.

42 Auf einem Leiter kann die freie Energie abfließen, bis sie auf einen Widerstand stößt, d. h. auf eine Stelle, die freie Energie aufnehmen kann. Ist sie stark genug, um diesen Widerstand zu überwinden oder, was dasselbe ist, ist diese freie Energie größer als die Aufnahmefähigkeit der Stelle für sie beträgt, so geht sie weiter, aber selbstverständlich mit um die Abgabe verminderter Größe. Mit dieser kann sie einen zweiten Widerstand überwinden usf., bis sie auf Null gebracht ist oder bis auf der Bahn kein weiterer Widerstand angetroffen wird. Dann fließt der Rest der Energie zum Anfangspunkt zurück. Wäre ihr dieser Weg zum Anfangspunkte abgeschnitten, so fände sie an diesem Punkte gerade einen Widerstand, was ja ausgeschlossen sein soll. Die Wirkung ist aber die, als wenn nur so viel Energie durchgeflossen ist, wie der Widerstand im Stromfaden beträgt. Ist aber die in der Zeit des Durchfließens erzeugte freie Energie größer als die Arbeit innerhalb eines Stromfadens, so wird die freie Energie weitere Stromfäden durchfließen und dort die gleiche Arbeit verrichten. Bezeichnet man dann die in der Zeiteinheit erzeugte freie Energie mit E, die Zeit des Durchfließens irgendeiner Strommenge durch die Strombahn mit t, die Arbeit innerhalb irgendeines Stromfadens während dieser Zeit mit A, die Anzahl der Stromfäden mit n, so ist: $E \cdot t = n \cdot A$. Wenn drei dieser Größen bekannt sind, läßt sich die vierte ermitteln, z. B. n aus E, t, A. Kennt man die Anzahl der möglichen Stromfäden, so kann man entscheiden, ob die Leitung noch mehr Energie übermitteln kann. Und wenn sie bei hinreichend großer freier Energie nicht so viel Energie befördert, als rechnerisch möglich ist, so kann man schließen, daß sich die Stromfäden gegenseitig beeinflussen, also einen breiteren Raum einnehmen als der Querschnitt eines Atoms beträgt. Jedenfalls müssen sich die Stromfäden, wenn zu viele in einen dünnen Draht eingeführt werden, gegenseitig stören und hemmen und dadurch in die Lage kommen, ihre Schraubenenergie in Schwingungsenergie, d. i. Wärme, umzusetzen. So erklärt sich die Erwärmung eines Drahtes bis zur Glühwirkung, die oft nach allmählichem Ansteigen der Wärme plötzlich auftritt, auf die einfachste Weise.

Nun kann die Frage aufgeworfen werden, ob durch e i n Atom nur e i n Stromfaden hindurchgeht, oder mehrere. Was die Leiter betrifft, so läßt sich darüber so lange kein Urteil bilden, als keine Erfahrungen vorliegen, die eine Annahme nahelegen. Aber in bezug auf die Lösungen läßt sich eine Annahme machen. Denn während der elektrische Strom in Leitern außer der bei den Versuchen im allgemeinen nicht beabsichtigten Erwärmung keine Arbeit leistet, hat er in den Lösungen nach jeder Theorie die Entionisierung oder Neutralisierung der Atome bzw. Radikale durchzuführen. Bei Annahme der Großmolekelvorstellung besteht diese Aufgabe darin, die an das Atom angelagerten H_2O-Molekelpaare wieder loszulösen. Da nun ein Na-Atom nur eine Stelle hat, an der zwei H_2O haften, ein Zn-Atom dagegen zwei, so müssen durch ein Zn-Atom doppelt so viele Stromfäden gehen als durch ein Na-Atom; und durch eine Großmolekel PO_4 müssen dreimal so viele Stromfäden gehen. Nimmt man nun der Einfachheit wegen an, daß jeder Valenzeinheit e i n Stromfaden entspricht, wie es eigentlich auch die Vorstellung des Stromfadens fordert, so gehen durch die Großmolekeln eines einwertigen Ions ein, durch die eines zweiwertigen zwei, eines dreiwertigen drei Stromfäden, um dort die Arbeit des Entionisierens zu leisten. Besteht die ganze

Arbeit nur darin, die H_2O aus den Ionen durch Aufwärmen wieder freizumachen, so wird in allen Zellen pro Valenzeinheit dieselbe Arbeit geleistet; besteht daneben jedoch noch eine andere Aufgabe, z. B. die bei der Ionisierung abgegebene Wärme wieder zu ersetzen, so ist in den hintereinandergeschalteten Zellen eines Stromkreises in jeder Zelle eine verschiedengroße Arbeit zu leisten, doch so, daß in jedem Stromfaden beim einmaligen Durchlaufen der Energie durch alle Zellen dieselbe Arbeitsgröße abgegeben wird. Dann fließen durch alle Zellen gleich viele Stromfäden; in jedem wird dieselbe Energie abgegeben, während die in den einzelnen aufeinanderfolgenden Stellen abgegebene Energiemenge eines Stromfadens verschieden groß ist. Aber in allen Zellen werden gleichviel Valenzen freigemacht, da dies nur von der Anzahl der Stromfäden abhängt. Ändert sich die freie, zur Verfügung stehende Energie, so ändert sich in demselben Maße die Anzahl der Stromfäden, also auch die Zahl der freiwerdenden Valenzen, aber in allen Zellen zu gleicher Zeit. Dies ist aber die Forderung des Faradayschen Gesetzes; demnach läßt sich dies Gesetz über die Menge der durch einen elektrischen Strom gebildeten Zersetzungsprodukte verschiedener Salze und Säuren aus der Großmolekelstellung auf einfache Weise ableiten; und die Zuhilfenahme elektrischer Elementarquanten zu diesem Zwecke ist nicht notwendig. Das ist aber ein wichtiger Punkt; denn eine Theorie, die das Faradaysche Gesetz nicht auf eine einfache Weise erklärt, kann keinen Anspruch auf Beachtung erheben.

43 Aber noch ist der Mechanismus, der die Zerspaltung in den Zellen bewirkt, nicht völlig klargelegt. Nach Früherem muß ein Salz in einem Lösungsmittel in Ionen d. i. Großmolekeln zerspalten werden, weil bei diesem Vorgang Energie frei wird, die, wenn sie abfließt, den gegebenem Träger in den stabileren Zustand überführt. Diese freie Energie ist, wie der erste Abschnitt zeigt, Schraubenenergie, aber solche mit überwiegender Drehwucht. Sie werde in einer galvanischen Zelle erzeugt und nach einer elektrischen Zelle hingeleitet, in der sich die Ionen eines Salzes, etwa NaCl befinden; diese bewegen sich als Großmolekeln zwischen den übrigen H_2O-Molekeln stoßend, drehend, wälzend herum; dabei sind die Richtungen der Rotationsebenen der H_2O in den Großmolekeln nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit gleichmäßig verteilt, so daß keine Richtung des Raumes für die Lage der Rotationsebenen bevorzugt ist. Sowie aber auf der Anode die freie Energie des galvanischen Elementes anlangt, übt sie auf die Rotationsbewegungen die Wirkung aus, daß sich diese Ebenen parallel stellen und die Rotationen alle die gleiche Richtung erhalten. Die Wirkung beginnt bei den Nachbarmolekeln der Anode und setzt sich bis zur Kathode fort. Die freie Energie tritt vermöge ihrer Längswucht auf eine bei der Anode liegende Großmolekel über und vergrößert dadurch die Drehwucht der rotierenden H_2O, bis diese eine so große Energie erhalten, daß sie sich als freie H_2O bewegen können, also den Zusammenhang mit Na bzw. Cl aufgeben. Nun kann aber auch der Fall eintreten, daß die bei der Großmolekelbildung auf Grund der Zusammenlagerung mehrerer Molekeln zu einer abgegebene Energie größer gewesen ist als die Energie, welche grade genügend gewesen ist, um nur die H_2O freizumachen, wie es z. B. beim Zn der Fall ist, das pro Valenzeinheit bei der Großmolekelbildung 16300 cal abgibt, also bei der Entionisierung auch dieselbe Energie aufnehmen muß. Dann muß die Drehwucht auch diese Energie liefern.

Auch für die größere oder geringere Aufnahme oder selbst Abgabe von Energie bei der Entionisierung kann man sich ein Bild des mechanischen Vorganges unschwer machen. Ihr muß bei der Ionenbildung eine ebensogroße

Abgabe bzw. Aufnahme von Energie entsprechen. Nach der hier entwickelten Vorstellung verwandelt sich die feste Salzmolekel zunächst durch Anlagerung von zwei H_2O in die flüssige und durch weitere Aufnahme von H_2O in die Ionen. Die H_2O bewegen sich im Kreise um den Ionenkern. Dieser Kreis wird je nach der Art des Elementes einen größeren oder kleineren Radius haben. Je kleiner der Radius ist, desto kleiner ist bei gleicher Winkelgeschwindigkeit die Geschwindigkeit selbst; desto stärker muß die Winkelgeschwindigkeit anwachsen, wenn die ganze Längswucht der ihre Selbständigkeit aufgebenden Wassermolekeln zur Rotationsgeschwindigkeit verwertet wird. Sie weist dann einen Überschuß auf, der durch die Zusammenstöße mit den umgebenden Wassermolekeln auf die der gegebenen Temperatur entsprechende Winkelgeschwindigkeit herabgedrückt wird und sich in einer gleichmäßigen Temperaturerhöhung bemerkbar macht. Je größer der Radius ist, um so kleiner wird sich die Winkelgeschwindigkeit gestalten; und die Ionen können dadurch in die Lage kommen, aus der umgebenden Wassermenge noch Energie für sich aufzunehmen. Bei Zn ist anzunehmen, daß die H_2O der flüssigen Salzmolekeln einen größeren Kreis beschreiben als die des Ions Zn und demnach bei der Ionenbildung Energie an die Lösung abgeben, während bei Cu die H_2O des Ions den größeren Kreis beschreiben und demnach aus der Lösung Wärme aufnehmen, um zum Energiegleichgewicht zu kommen. Umgekehrt muß das Ion Zn, um den Ionenstand aufzugeben, erstens die Energie wieder aufnehmen, die vorher abgegeben war, damit der kleinere Kreis mit der zutreffenden Winkelgeschwindigkeit durchlaufen werden konnte und zweitens die Energie, welche die H_2O wieder selbständig macht. Dagegen muß Cu nur die zweite Energie aufnehmen und anderseits die zur Vergrößerung des Bewegungskreises der H_2O aufgenommene Energie abgeben, so daß nur der Unterschied beider in Frage kommt.

Mit dieser Bemerkung soll nicht gesagt sein, daß das gegebene Bild dem tatsächlichen Vorgange notwendig entspricht; es soll nur dargelegt werden, daß die bei der Ionenbildung verschiedener Elemente festgestellte Energieabgabe bzw. -aufnahme überhaupt mechanisch vorstellbar ist. Jedoch hat dieses Bild einen über die Elektrolyse hinausgehenden Erklärungswert, da es auch das Verhältnis der Metalle zu O zu erklären vermag. Wenn die H_2O bei ihrem Kreisen um die Atome der leicht oxydierbaren Metalle einen kleineren Bewegungsradius haben, so darf das gleiche auch für O in den Oxyden vermutet werden. Dann wird O von ihnen fester gebunden, weil eine größere Energie erforderlich ist, um die Trennung herbeizuführen. Dagegen wird bei den edlen Metallen eine leichte Abgabe von O zu erwarten sein, wenn mit ihr Energie frei wird.

44 Die bisherige Erklärung reicht nicht aus, die Tatsache verständlich zu machen, daß das Anion an die Anode, das Kation an die Kathode geht. Wenn beide Ionenarten sich in der Lösung gleichmäßig zerstreut finden, dann liegen Anionen u n d Kationen gleichmäßig an der Anode und Kathode; man sollte also erwarten, daß beide dort gleichmäßig ausgeschieden würden. Daß dies nicht der Fall ist, deutet auf eine Polarität der elektrischen Wirkung, welche verständlich zu machen, grade zur Annahme der beiden Elektrizitätsarten geführt hat: es gilt daher noch, diese Polarität zu erklären. Schon in dem vorigen Abschnitt habe ich die Vorstellung besprochen, daß alle in Wasser gelösten Stoffe dadurch zur Lösung kommen, daß sie sich mit Wasser zu Großmolekeln verbinden, wobei die H_2O-Paare um die Molekeln des gelösten Stoffes rotieren. Ich habe die Folgerung gezogen, daß die Rotation dieser Wassermolekeln bei Salzen in dem Sinne erfolgt, daß vom Kation aus die Rotation immer in demselben, und zwar negativem Sinne gesehen

wird und natürlich vom Anion aus in dem entgegengesetzten Sinne erscheint. Es ist dabei zu bemerken, daß die Annahme der Rotation in grade entgegengesetztem Sinne vielleicht ebenso berechtigt gewesen wäre, daß aber nur eine dieser Annahmen gemacht werden kann, die dann für alle Salze gilt. Aber von der Entscheidung, welche der beiden möglichen Annahmen gemacht wird, hängt gleichzeitig ab, wie die Schraubenbewegung der freien Energie anzunehmen ist, ob sie von der Anode durch die Flüssigkeit zur Kathode oder umgekehrt verläuft. Nimmt man für diese an, daß sie sich immer von der Anode durch die Flüssigkeit bewegt, so ist gleichzeitig damit festgesetzt, daß die Drehbewegung der an der Anode eintretenden freien Energie in negativem Sinne erfolgt.

Ich habe dann gefolgert, daß bei der Zerspaltung der Salze in Ionen die ursprüngliche Rotation bestehen bleibt und daß, wenn man in einem Ion den Bestandteil der ursprünglichen Salzmolekel den Kopfteil, die rotierenden H_2O-Molekeln den Flächenteil nennt, beim Kation die Rotation, vom Kopfteil aus gesehen, in negativem Sinne verläuft.

Nach diesen Festsetzungen muß die der Anode zugeführte Energie als Schraubenenergie mit einer Drehung in negativem Sinne zur Salzlösung gelangen und die Ionen in derselben so stellen, daß ihre Rotation, von der Anode aus gesehen, in negativem Sinne verläuft. Dann müssen die Kationen ihre Kopfteile nach der Anode, die Anionen die ihrigen nach der Kathode richten und die Flächenteile natürlich umgekehrt. Das Anion stellt also seinen Flächenteil nach der Anode. Ein der Anode unmittelbar benachbartes Anion hat dann nicht nur dieselbe Drehungsbewegung wie die freie Energie auf der Anode, sondern wendet ihr auch den Flächenteil zu. Dann wird dieser aber an die Anode gedrängt, indem etwa zwischen ihnen liegende H_2O-Molekeln der Lösung durch die in gleichem Sinne erfolgten Drehbewegungen herausgeschleudert werden und indem die unregelmäßigen Stöße der H_2O-Molekeln auf der Kopfseite des Anions dieses gegen die Anode treiben. Wollte sich ein Kation in gleicher Weise mit seinen H_2O-Molekeln an die Anode legen, so würde es mit der Drehwucht auf dieser entgegengesetzte Bewegungsrichtung haben, und beide, Anode und Kation, würden sich abstoßen; gleichzeitig würde eine Drehung des Kations um 180° erfolgen und dadurch der Kopfteil des Kations zwischen Anode und die rotierenden H_2O-Molekeln kommen; dann würde der Übergang der Anodenenergie auf die rotierenden H_2O unmöglich werden, wenn eine Berührung der Anode mit den, die Energie aufnehmenden H_2O erforderlich ist. Nun muß man aber, wenn man die Fernwirkungen in den Erklärungen beseitigen und durch Nahewirkungen ersetzen will, auch die Fernwirkungen auf die kleinsten Strecken hin ablehnen und sieht sich bestimmt, die Übertragung allein durch Berührung anzunehmen. Dann ist es aber gar nicht möglich, daß die Schraubenwucht der Anode mit der Drehwucht der H_2O zusammenkommt, so daß sich auch nicht die eine zu der anderen addieren kann. Man kann nicht einwenden, daß die Dimensionen eines Ions so klein seien, daß fast eine unmittelbare Berührung der Drehbewegungen stattfinde. Die Entfernung, wenn auch klein, ist nicht verschwindend klein zu den in Frage kommenden molekularen Größen; und von Schwankungen der Rotationsebene der H_2O kann keine Rede sein, da diese genau parallel zur Anodenfläche eingestellt ist. Dagegen wird ein Kation in der Nähe der Kathode aus dem gleichen Grunde an die Kathode gedrängt wie das Anion an die Anode. Es kann daher die auf der Anode befindliche Energie auf das Anion und die auf der Kathode befindliche auf das Kation übergehen und beide durch die Auffüllung der mangelnden Wucht die Großmolekeln zum Zerfall bringen,

also die Ionenkerne und H_2O jede für sich freimachen. Aber sie kann es nicht nur, sondern sie muß es, da die Schraubenenergie frei ist und daher jede Arbeit ausführen muß, die zur Erzielung eines neuen Energiegleichgewichts erforderlich ist. Man sieht also, daß die in einem galvanischen Element durch Bildung von Großmolekeln erzeugte Schraubenenergie in der elektrolytischen Zelle die Rückbildung der Großmolekeln in ihre Bestandteile bewirken muß. Durch den geschilderten Mechanismus wird von dem galvanischen Element nach der Zelle Energie übertragen in gleicher Weise wie die einfachen Maschinen von einer Stelle zur anderen Energie übertragen. Und, ebenso wie dort, ist es auch hier die Aufgabe der Technik, diese Übertragung möglichst wirtschaftlich zu machen, also mit möglichst geringer Umwandlung dieser elektrischen Energie in Wärme. Man kann auch die Trennung des Kations eines Salzes vom Anion allein durch Wärme erzielen, indem man die Salze zum Schmelzen bringt. Aber dann ist die ganze aufgewandte Schmelzwärme verloren, wenn man die Zersetzungsprodukte bei normaler Temperatur weiter verarbeiten will. Der technische Vorteil der elektrolytischen Behandlung der Salzlösungen anstatt der Salze beruht eben darauf, daß die Großmolekelbildung die Ionen schon bei gewöhnlicher Temperatur voneinander trennt und daß außerdem die Trennung des Wassers von den Ionen ebenfalls bei niedriger Temperatur erreicht werden kann.

45 Für die elektrolytische Zersetzung scheint die Schraubenenergie am wirtschaftlichsten zu sein, welche möglichst wenig Längswucht enthält, da diese für den Vorgang bedeutungslos erscheint und nur in Wärme übergeht. Doch ist diese Ansicht nicht ganz richtig. Allerdings enthält die Energie des galvanischen Elementes auf Grund ihrer Entstehung überwiegend Drehwucht; aber deshalb ist ihre Längswucht nicht überflüssig, da sie die wichtige Aufgabe hat, die Drehwucht an die richtige Stelle zu bringen. Die Lösung besteht aus Ionen und Wasser. Nun ist Wasser ein schlechter Leiter und nach meiner im vorigen Abschnitt dargelegten Ansicht gar kein Leiter. Dann bleiben für die Übertragung der Drehwucht nur die Ionen selbst übrig. Daß sie dazu befähigt sind, folgt daraus, daß sie die entsprechende Drehbewegung haben und diese nach der Schraubenwucht des galvanischen Elementes orientieren. Aber zwischen ihnen liegen die Wassermolekeln. Die rotierenden Ionen, die alle in demselben Sinne wirken, werden sich in Form von Fäden von der Anode zur Kathode einstellen, werden, soweit möglich die zwischen ihnen liegenden H_2O aus der Fahrrinne schleudern und so eine Art Gasse für die Übertragung der Energie bilden. Da aber zur Übertragung Berührung notwendig ist, müssen die Ionen in der Fadengasse hin und her pendeln, um zwischen den Ionen die Verbindung herzustellen. Zu dem Zweck muß die Längswucht auf der Anode imstande sein, dem berührten Ion eine solche Geschwindigkeit zu geben, daß das Pendeln zwischen den Ionen eines Fadens möglich wird. Diese Geschwindigkeit ist das, was man in diesem Falle Spannung nennt. Daraus folgt, daß, je geringer die Anzahl der Ionen in der Volumeinheit der Lösung, je größer also der Abstand zwischen ihnen in einem Faden ist, um so größer die Spannung sein muß, um den Strom durch die Flüssigkeit zu leiten. Dies ist auch mit der Erfahrung in Übereinstimmung.

Aber man kann nun den erheblichen Einwand machen, daß, wenn die Energie von der Anode auf die einzelnen Ionen übergeht, diese soweit von der übertragenen Energie aufbereitet werden, daß mitten in der Flüssigkeit der Zerfall der Großmolekeln vor sich gehen muß, der dort aber nicht beobachtet wird. Ferner müßte die Isolierung der Ionenkerne in der ersten

Zelle zunächst allein vor sich gehen und in der zweiten Zelle nicht eher beginnen als bis die erste Zelle elektrolytisch vollständig zersetzt ist. Auf diesen Einwand läßt sich erwidern, daß er die Zeit nicht berücksichtigt. Damit die Drehwucht auf einem Ion im Innern der Flüssigkeit zur Wirkung kommt, ist eine bestimmte Zeit notwendig. Bevor diese Zeit verstrichen ist, kann die Schraubenwucht längst über das Ion hinweggetragen worden sein. Dann würde man die Zersetzung an den Elektroden darauf zurückführen können, daß der Übergang zwischen Elektrode und Flüssigkeit und umgekehrt mit einer Zeitverzögerung verknüpft wäre, die die Abstoßung der H_2O gestattete. Anderseits kann man die Annahme eines Zeitverlustes auch umgehen und zulassen, daß auch in der Mitte der Flüssigkeit diese Zersetzungen möglich sind: dann würden sich an derselben Stelle isolierte Na und Cl bilden; diese würden sich zu Molekeln NaCl zusammenschließen und dann wieder in Ionen zerlegen, ohne daß dieser Vorgang der Beobachtung zugängig wäre. Dagegen kann an den Elektroden diese Neubildung von Salz nicht vor sich gehen, da das isolierte Atom bzw. Radikal sich fest an die Elektrode anlegt, also nicht mehr frei beweglich ist. In Wirklichkeit dürften diese Umlagerungen im Innern der Flüssigkeit gar nicht stattfinden, da sie einen unnützen Vorgang vorstellen würden, der mit keiner Verlagerung von Energie verknüpft wäre. Es ist zu erwarten, daß an diesem Punkte Einsprüche gegen die ganze Darstellung werden erhoben werden. Aber kein Einspruch darf an der Frage vorübergehen, wie die bisherigen Theorien diese Schwierigkeit beheben.

Damit ist der Versuch zu Ende geführt, auf einem Teilgebiet der Elektrizität, der galvanischen Zersetzung, die Vorgänge ohne Annahme elektrischer Elementarquanten auf rein mechanischem Wege auf die Verlagerung kinetischer Energie zurückzuführen, die bei der Großmolekelbildung frei wird. Diese Erklärung wird den Tatsachen besser gerecht als diejenige durch Elementarquanten, wenn man auch von den Unbegreiflichkeiten der in ihnen angenommenen Kräfte absieht. Sie nimmt nur ein Fließen freier Energie an, die einen neuen Zustand des Energiegleichgewichts aufsucht und schafft, während die alte Vorstellung zwei, in entgegengesetzter Richtung fließende Ströme vorsieht, die sich in demselben Drahte nicht im geringsten stören. An Stelle der wunderbaren $+e$ und $-e$ kommt sie mit Bewegungen aus, die, in demselben Sinne verlaufend, eine Anziehung der Träger zur Folge haben, vermöge der in ihrer nächsten Umgebung wirkenden bewegten Massen, und, in entgegengesetztem Sinne verlaufend, eine Abstoßung der Träger wieder durch den Einfluß der umgebenden bewegten Massen veranlassen. Die an den Molekeln haftenden Bewegungsgrößen werden, von der einen Seite betrachtet, in der alten Vorstellung als $+e$, von der anderen Seite betrachtet, als $-e$ behandelt, so daß diese, für Massen gehalten, in ihrer Größe einander gleich sein müssen.

4. Abschnitt.

Die Diffusionsvorgänge im Elektrolyten.

46 Meiner im letzten Abschnitt dargelegten Auffassung der Ionen als Atomen bzw. Radikalen, die mit bestimmten Mengen H_2O verbunden sind, kann man den Vorwurf machen, daß sie in der Luft schwebe, da sie nicht durch Versuche gestützt werde. Man kann die Auffassung höchstens als möglich, nicht aber als notwendig halten. Dieser Vorwurf ist berechtigt und darf daher nicht unbesprochen bleiben. Zunächst darf man aber die

Frage aufwerfen, ob die herrschende Theorie von ihm frei ist. Ist schon jemals ein (+ e) gesondert nachgewiesen worden, frei von dem (— e)? Meines Wissens noch nie. Ist daneben der Umstand, daß je 1 (+ e) mit einem (— e) immer miteinander zusammen auftreten sollen, nicht etwas Außerordentliches, etwas für den nüchternen Verstand Unverständliches? und muß sich nicht das Bedürfnis aufdrängen, diese auffällige Tatsache zu begründen? Denn niemand darf diese Tatsache vom wissenschaftlichen Standpunkte als selbstverständlich ansehen. Dürfte sich nicht bei unseren so verfeinerten optischen Methoden der Versuch als lohnend erweisen, die (+ e) und (— e) als wirklich vorhanden nachzuweisen? Dann sind in diesem Punkte die alte und die neue Theorie als gleich bedürftig anzusehen.

Es kann weiter die Frage nach der Einfachheit der Vorstellung gestellt werden. Ich will hier nicht die Kritik an der Helmholtzschen Lehre des letzten Abschnittes wiederholen. Aber wer sich dieser Kritik erinnert, dem möchte ich die Frage vorlegen, welche Auffassung, die meinige oder die von Helmholtz, dem wahren Verständnisse mehr Schwierigkeiten bietet? Ich glaube bestimmt, daß die meisten die letztere als einfacher ansehen werden.

Aber schließlich kommt es doch auf Versuche an, die die Entscheidung bringen müssen. Solche Untersuchungen sind zum Teil bereits gemacht, aber falsch ausgedeutet worden; zum Teil sind sie unterlassen worden, da ihre Notwendigkeit den Forschern bei ihrer vorgefaßten Theorie gar nicht zum Bewußtsein gekommen ist. Dahin sind in erster Linie die bekannten, umfangreichen Versuche Hittorfs zu rechnen, die bei ihrer Veröffentlichung in Poggendorfs Annalen von den damals herrschenden Gelehrten Berzelius, Magnus, Wiedemann abgelehnt, als aber die Helmholtzsche Theorie durchdrang, ebenso allgemein anerkannt worden sind. Es ist sehr interessant, diese Entwicklung in der Wissenschaft zu verfolgen.

47 Hittorf steht auf der Grothußschen Vorstellung, nach der die elektropositiven und -negativen Bestandteile eines Salzes dauernd in jeder Molekel zusammen lagern und nur vorübergehend beim Übergang des elektrischen Stromes getrennt werden, worauf sich das freigewordene Kation der einen Molekel mit dem Anion der in der Richtung des elektrischen Stromes liegenden Nachbarmolekel vereinigt. Da diese Molekeln in der Lösung gleichmäßig verteilt sind und demnach festbestimmte gleiche Abstände haben, so müssen diese Ionen einander nähern, um die neue Molekel zu bilden. Diese Annäherung braucht nicht von beiden Ionen mit gleichen Schritten bewirkt zu werden. Nach seiner Ansicht legt in einer $CuSO_4$-Lösung das Cu-Ion den 0,356ten Teil des ganzen Abstandes und das SO_4-Ion den 0,644ten Teil zurück. Wenn sie gleiche Wege bis zur Begegnung zurücklegten, so würden die Abstände der in der Richtung des elektrischen Stromes liegenden neugebildeten Molekeln $CuSO_4$ dieselben bleiben wie die alten. Wenn aber das Cu-Ion langsamer vorschreitet als das SO_4-Ion, so müssen die Abstände zwischen zwei benachbarten Molekeln immer kleiner werden; und zwar müssen sich die $CuSO_4$ mehr und mehr der Anode nähern. Diesen Schluß hat er aber nicht gezogen; im Gegenteil hat er angenommen, daß die Lösung zwischen Anode und Kathode dieselbe gleichmäßige Dichte wie im Anfang habe. Er schloß dies daraus, daß die Lösung in einem gewissen Abstande von den Elektroden neutral reagierte. Doch bleibt dieser Schluß unverständlich, da die neutrale Reaktion bestehen bleibt, wenn die Dichtigkeit der Lösung sich auch ändert. Ich begnüge mich damit, auf diese Unklarheit hinzuweisen.

Die Zahl 0,356 hat Hittorf durch einen Versuch gefunden, indem er feststellte, wie viel Cu als $CuSO_4$ nach einer längeren Dauer der elektrischen

Stromwirkung in dem Kathodenraum angetroffen wurde, außer dem auf der Kathode niedergeschlagenen Cu. Er fand, daß dieses Cu, in $CuSO_4$ enthalten, der 0,356 te Teil des auf der Kathode niedergeschlagenen Cu war. Diese Menge ist kleiner als die an der Kathode ausgeschiedene. Nun ist an der Anode die gleiche Menge Cu in die Lösung übergeführt worden, so daß diese dauernd dieselbe Menge $CuSO_4$ enthält. Daher ist an der Anode ein Überschuß an $CuSO_4$ vorhanden, der dem Manko an der Kathode entspricht. Hätte Hittorf die Cu-Menge, als $CuSO_4$ ermittelt, an der Anode bestimmt, so dürfte er dort den Überschuß festgestellt haben, den er an der Kathode mit 0,356 als Unterschuß ermittelt hat. Und wenn er nach der Elektrolyse die Lösung einige Zeit sich selbst überlassen hätte, so würde er an der Kathode dieselbe Menge $CuSO_4$, also die Überführungszahl 1 gefunden haben. Diese Zusammenstellung zeigt schon an, daß seine Überführungszahl 0,356 auf keiner sicheren Grundlage beruht, wohl aber mit der Diffusion in Zusammenhang zu bringen ist.

Da kam 1881 Helmholtz' Faraday-Rede in London, in der dieser die Grothußsche Vorstellung über den Haufen warf und an die Stelle der nur für den Augenblick der elektrolytischen Zersetzung stattfindenden Trennung des Anions vom Kation das dauernde Getrenntsein derselben in einer verdünnten Salzlösung setzte und die gleichmäßige Verteilung der Anionen und Kationen durch die ganze Lösung infolge der Diffusion zugrunde legte. Da hatte die Vorstellung der verschiedenen Geschwindigkeiten der Anionen und Kationen in der Lösung gar keinen Sinn mehr. Während nach der Grothußschen Vorstellung der elektrische Strom die Bewegung der Ionen nach Anode und Kathode bewirkte und außerdem die Trennung und Wiedervereinigung der Ionen besorgte, kam diese letztere gar nicht mehr in Frage, da sie immer getrennt blieben; und die erstere war überflüssig, da infolge der Diffusion immer an Anode und Kathode genügende Mengen der der Entionisierung verfallenden Anionen und Kationen vorhanden waren und da dieselbe Diffusion das durch den Strom gestörte Gleichgewicht in der Verteilung der Ionen immer wieder herstellte. In dieser Zeit hätten die Überführungszahlen im Sinne Hittorfs nicht länger einen Baustein der Wissenschaft bilden dürfen. Aber grade damals wurden die Arbeiten Hittorfs besonders hoch bewertet; und seine Überführungszahlen spielen bis auf die Gegenwart eine bedeutende Rolle. Seine in Poggendorfs Annalen veröffentlichten Arbeiten wurden neu gedruckt und dadurch in vielen Exemplaren den wissenschaftlich Strebenden zugeführt. Aber es scheint nicht, daß sie von den Anhängern der neuen Lehre darauf geprüft sind, ob seine Überführungszahlen sich mit ihr vertrügen. So zeigt sich die Tatsache, daß die Wissenschaft — Hittorfs und Helmholtz' Anschauungen unbedenklich als nebeneinander berechtigt angesehen hat; und man erkennt daraus gleichzeitig, wie leicht es ist, neben einer neu aufgenommenen Vorstellung eine alte, die mit ihr im Widerspruch steht, weiter gelten zu lassen.

48 Diese Prüfung soll hier nun nachgeholt werden und zwar an dem ersten Versuch, den Hittorf beschreibt, dem schon berührten der Elektrolysierung einer $CuSO_4$-Lösung zwischen Cu-Elektroden, deren Verlauf nach meiner Vorstellung erklärt werden soll. Die Ionen der Lösung sind nach Helmholtz' Vorstellung gleichmäßig in ihr verteilt; aber während Helmholtz die Anionen mit (— e), die Kationen mit (+ e) beladen denkt, nehme ich an, daß sie, pro Valenzeinheit mit zwei H_2O beladen, mit diesen Großmolekeln bilden. Der an der Anode eintretende Strom stellt die Ionen der Lösung so, daß die, an den Ionenkernen rotierenden H_2O-Molekeln sich parallel der Drehwucht des Stromes stellen, dann wenden die Anionen die Flächen der

rotierenden H_2O der Anode, die Kationen der Kathode zu; die unmittelbar an die Anode stoßenden Ionen nehmen durch Berührung der H_2O mit der Anode die in gleichem Sinne verlaufende Drehwucht auf, vergrößern dadurch ihre Energie so weit, daß sie unabhängig von ihrem SO_4-Kern werden und dieser dadurch entionisiert wird. Das gleiche erfolgt an einem Kation an der Kathode, da hier gleichfalls die H_2O die Kathode berühren. Ein Kation an der Anode wendet nach Parallelstellung der Rotationsebene der H_2O mit der Anode dieser den Kern Cu zu, so daß die elektrische Energie die H_2O nicht berühren und auf sie nicht übertreten kann, das Kation kann demnach an der Anode nicht entionisiert werden; das gleiche gilt von einem Anion an der Kathode. Die von den H_2O-Molekeln freien Ionenkerne können alle chemischen Reaktionen ausführen, deren sie fähig sind. Daher wird sich das Cu auf der Kathode ablagern, das SO_4 an der Anode mit einem dort anhaftenden Cu zur Molekel $CuSO_4$ vereinigen, die aber gleich wieder in die Ionen Cu und SO_4 zerfällt. An dem Cu-Ion an der Kathode hafteten vier H_2O, die frei geworden sind; an der Anode werden zunächst die vier H_2O des SO_4-Ions frei; aber bei der Zerspaltung des gebildeten $CuSO_4$ in Ionen werden acht H_2O gebraucht, so daß im ganzen vier H_2O gebunden werden. An der Kathode wird die Lösung demnach verdünnt, an der Anode verdichtet. An der Kathode verschwindet ein Cu-Ion; dafür treten vier H_2O auf. Demnach ist dort ein Überschuß von drei raumeinnehmenden und druckausübenden Molekeln. An der Anode scheidet ein SO_4-Ion aus; dafür treten ein SO_4-Ion und ein Cu-Ion auf, außerdem scheiden vier H_2O aus; demnach fallen hier drei raumeinnehmende und drückende Molekeln fort. An der Kathode muß demnach ein Volum- und Druckzuwachs auftreten, an der Anode eine gleichgroße Abnahme. An der Kathode ist die Anzahl der Cu-Ionen um eine vermindert, an der Anode um eine vermehrt, so daß die gleiche Verteilung dieser Ionen gestört ist. Dagegen bleiben die SO_4-Ionen durch die Lösung gleichmäßig verteilt. Die ungleiche Verteilung der Cu-Ionen wird durch die Diffusion auszugleichen gesucht, indem ein Abfluß derselben von der Anode nach der Kathode erfolgt. Die ungleich gewordene H_2O-Verteilung wird durch einen Abfluß von H_2O von der Kathode nach der Anode bewirkt. Diese beiden Abflüsse erfordern Zeit bis zur Herstellung des Gleichgewichts. Durch Einschalten von hemmenden Membranen kann man diese Zeit vergrößern und dadurch Untersuchungen über die Abflußgeschwindigkeit anstellen.

Die Überführung des Cu wie H_2O geschieht nur durch Diffusion nach dieser Vorstellung. Man kann demnach diese Überführungen unter Ausschaltung des elektrischen Stromes künstlich hervorrufen, indem man in einer Zelle an der einen Seite genau so viel Cu-Ionen etwa durch Zutröpfeln einer $CuCl_2$-Lösung zufügt, daß die beim elektrischen Strome auftretende Differenz von 2 Cu-Ionen erhalten bleibt, und feststellen, wie groß der Transport der Cu-Ionen nach der anderen Seite ist, ob unter genau den gleichen Bedingungen Hittorfs Zahl 0,356 auftritt. Natürlich muß der Eintritt der Cl-Ionen mit in Rechnung gezogen werden.

Nach meiner Auffassung ist die Zahl 0,356 das Verhältnis der durch die Diffusion von der Anode nach der Kathode zurückgeflossenen Cu-Ionen zu der Menge der an der Kathode aus der Lösung ausgeschiedenen Cu-Ionen. Dagegen wird während der ganzen Elektrolyse an der Verteilung der SO_4-Ionen nichts geändert, so daß von ihrer Überführung keine Rede sein kann. Auch diese Schlußfolgerung läßt sich durch einen Versuch unschwer nachprüfen. In gleicher Weise muß die Zunahme der H_2O an der Kathode und der Abnahme an der Anode und der damit zusammenhängende Überdruck an

der Kathode durch Versuche ermittelt werden können, wenn meine Vorstellung richtig ist. Auf einen dahingehenden, seit langem bekannten, bisher falsch gedeuteten Versuch komme ich noch zurück. Dieser Überdruck kann aus der Helmholtzschen Vorstellung nicht unmittelbar abgeleitet werden, während er aus meiner Vorstellung folgt. Demnach kann der entsprechende Versuch als ausschlaggebend zugunsten meiner Auffassung der elektrolytischen Vorgänge angesehen werden.

Wird der Hittorfsche Versuch mit einer Platinanode wiederholt, so stößt das entionisierte SO_4 auf Pt, mit dem es sich nicht verbindet; daher greift es H_2O an und bildet unter Ausscheidung von O H_2SO_4, das sich in 2 H-Ionen und 1 SO_4-Ion zerspaltet. Während dabei die SO_4-Ionen in der Lösung gleichmäßig verteilt bleiben, werden die Cu-Ionen an der Anode nicht vermehrt, so daß der Unterschied der Konzentration derselben an Anode und Kathode auf die Hälfte des früheren sinkt. Dann geht die Diffusion der Cu-Ionen nach der Kathode langsamer vor sich; und am Ende der Elektrolyse ist die Menge der nach der Kathode transportierten Cu-Ionen geringer. Die Überführungszahl muß demnach kleiner erscheinen, als 0,356, während sie nach Hittorf dieselbe bleiben muß. Der Versuch ist daher wichtig, weil ein Ausfall in meinem Sinne darauf hinweist, daß die Überführung nicht dem Strome direkt, sondern der Diffusion zu verdanken ist.

Nun ist bei Hittorfs Versuchen noch auf den weiteren Punkt hinzuweisen, daß er sowohl die Überführung des Kations wie des Anions untersucht hat, aber bei jeder Salzlösung nur die Überführungszahl des einen direkt bestimmt und die des anderen durch Subtraktion von 1 erschlossen hat. Dabei zeigt sich, daß er die Überführungszahl aus den gefundenen Mengen desjenigen Ions ermittelt hat, das aus der Lösung ausgeschieden wurde, sei es als fester Niederschlag auf der Elektrode oder als Gas, das aus der Lösung entwich. In diesen Fällen wird aber immer das gestörte Gleichgewicht der Konzentration dieses Ions gerade durch seinen Abfluß nach dieser Elektrode wieder hergestellt. Demnach kann jede Überführung eines Ions auf die Diffusion zurückgeführt werden; und die Zuhilfenahme des elektrischen Stromes dafür ist überflüssig und demnach unbegründet.

49 Die Bedeutung Hittorfs für die Wissenschaft ist hiernach nicht in seinen Überführungszahlen zu finden, sondern anderswo zu suchen. Zunächst hat er eine Methode gefunden, die durch den elektrischen Strom veranlaßten Zerfallsprodukte von Salzen zu untersuchen, und diese Untersuchung an einem umfangreichen Material durchgeführt. Diese Arbeiten haben ihm eine Einsicht in die Naturvorgänge verschafft, die der damaligen Zeit voraus war und in der Richtung der künftigen Entwicklung lag. So bezweifelte er die Berzeliussche Lehre von der Proportionalität zwischen der Stärke der Affinität und elektrischer Arbeit, wenn er auch noch nicht zu der Erkenntnis vordrang, daß die Affinität eine Eigenschaft ist, die auf einem gewissen Energiemangel beruht. Dann hat er die Vorstellung von Molekelkomplexen gebildet und sogar die Annahme gemacht, daß Ionen ganze Molekeln enthalten können. Die Erkenntnis von diesem seinen weiten Vorausblick in die Zukunft der Wissenschaft hat ihm das Vertrauen der Forscher zugewandt, so daß sie seine Überführungszahlen voreilig annahmen. Wäre ihm schon in der besten Zeit seines Schaffens das erst später gefundene van't Hoffsche Gesetz über die Größe des osmotischen Druckes bekannt gewesen, wie leicht hätte er dann auf Grund seiner umfassenden sorgfältigen Untersuchungen den Gedanken fassen können, daß an der Bildung der Ionen das Wasser unmittelbar beteiligt ist, und wäre dadurch damals zu einem großen Führer der Wissenschaft geworden? So hat ihm der Kampf um seine Anerkennung, der

Zwang, seine Untersuchung ohne die Unterstützung zahlreicher Schüler auszuführen, und die geringe Möglichkeit, seine Ansichten zur Geltung zu bringen, die in ihm schlummernden Kräfte zur weiteren Förderung der Wissenschaft lahmgelegt. Sein Verhängnis aber war die Bildung der Vorstellung der Überführung der Ionen durch den elektrischen Strom, und zwar für sich wie für die spätere Wissenschaft.

50 Ich gehe nun zu den Bemühungen anderer über, die Überführungszahlen durch Versuche festzustellen, beschränke mich aber auf die beiden bekanntesten, die in fast allen Lehrbüchern, auch den für den Schulgebrauch bestimmten, ausführlich erörtert werden, den von Nernst, der die Wanderung von MnO_4-Ionen einer $KMnO_4$-Lösung glaubt nachgewiesen zu haben, und den von Lodge, der die gleichzeitige Wanderung von H- und Cl-Ionen infolge des elektrischen Stromes behauptet hat. Nernst füllt den unteren Teil einer u-förmigen Röhre mit einer schwachen $KMnO_4$-Lösung, die mit Harnstoff vermischt ist, und füllt dann die Schenkel auf beiden Seiten bis zu gleicher Höhe mit einer KNO_3-Lösung derart, daß beide Lösungen sich nicht mischen. Dann werden in die beiden KNO_3-Lösungen Platinelektroden eingeführt und durch sie der Strom eines Akkumulators eingeleitet. Dann steigt das Niveau der $KMnO_4$-Lösung in dem Anodenschenkel und fällt um dieselbe Größe im Kathodenschenkel. Nernst behauptet, damit das Wandern der MnO_4-Ionen nach der Anode durch den elektrischen Strom sichtbar gemacht zu haben. Diese Behauptung ist ganz unhaltbar. Denn der elektrische Strom beeinflußt gar nicht die Permanganatlösung, sondern nur die Nitratlösungen, da die Elektroden nur in diese hineintauchen und die Beeinflussung der Ionen auch nach der jetzt herrschenden Vorstellung nur an den Elektroden erfolgt. Wenn er aber auf die Permanganatlösung wirken sollte, so müßte er die MnO_4-Ionen nach der Anode und die K-Ionen nach der Kathode treiben. Diese müßten dann in die die Anode umgebende Nitratlösung eindringen; und die MnO_4-Ionen müßten im Anodenschenkel in Gestalt von Fäden sichtbar werden; aber die ganze Permanganatlösung mitsamt dem Harnstoff dürfte sich nicht nach der Anodenseite verschieben. Und da Nernst in den Versuch einen Stromwechsel einführt, müßte sich bei diesem auch die andere KNO_3-Lösung mit MnO_4-Ionen füllen und sie rot färben.

Die tatsächliche Verschiebung läßt sich nur dadurch einfach erklären, daß durch die Elektrolyse die Flüssigkeitsmenge der Nitratlösung im Kathodenschenkel vermehrt oder im Anodenschenkel vermindert wird oder daß beides zugleich geschieht. Daß aber eine derartige Erklärung nicht auf die Wanderungen des Permanganats gestützt werden kann, dürfte jedem Einsichtigen klar sein. Deshalb ist es schwer zu begreifen, wie Nernst zu seiner Deutung gekommen ist, noch schwerer, daß sie bisher ohne Widerspruch geblieben ist, wenn nicht das Bestreben herrscht, zugunsten einer Theorie das Unmögliche möglich zu machen. Als ich den Versuch zuerst las, stand ich ihm verständnislos gegenüber; und diese Empfindung wird wohl mancher gehabt haben. Später erkannte ich, daß er falsch gedeutet war.

Nach meiner Auffassung hat der Harnstoff nur die Bedeutung, die Diffusion von $KMnO_4$ in KNO_3 zu erschweren. An der Grenze beider Lösungen kann sich das Nitrat des Harnstoffs bilden; dieses ist aber in einer Lösung von NO_3-Ionen schwer löslich. So mag dies der Grund sein, daß beide Lösungen nicht ineinander diffundieren. Je 2 K-Ionen an der Kathode werden durch den elektrischen Strom von ihren 4 H_2O-Ionen getrennt; indem sich die beiden entionisierten K mit 2 von den 4 H_2O zu 2 $KOH + H_2$ umsetzen, sind 2 $KOH + 2\,H_2O + H_2$ vorhanden. Von diesen 5 Molekeln entweicht H_2 als Gas, so daß an Stelle der beiden K-Ionen 4 Molekeln auftreten,

die Raum einnehmen und drücken. Der Überdruck von 2 Molekeln H_2O drückt die Permanganatlösung nach der Anode hin. Befindet sich an der Anode eine Silberelektrode, so bildet sich dort nach der Entionisierung von 2 NO_3-Ionen 2 $AgNO_3$, die wieder in Ionen zerfallen. Die Salzbildung macht 4 H_2O frei, die Ionenbildung entzieht der Lösung 8, so daß dem Lösungswasser 4 H_2O fehlen. Aber an die Stelle der 2 NO_3-Ionen treten 4 Ionen, 2 Ag- und 2 NO_3-Ionen, so daß die Anzahl der volumbeanspruchenden und druckleistenden Teile nur um 2 vermindert wird. Dann nimmt der Druck auf der Kathodenseite um ebensoviel zu, als er auf der Anodenseite abnimmt. Die Permanganatlösung, die sozusagen als Flüssigkeitspfropfen dient, muß sich nach der Anodenseite verschieben, während die Flüssigkeitssäulen auf beiden Seiten die gleiche Höhe behalten. Im Falle einer Pt-Anode, wie beim Nernstschen Versuch, bildet sich statt 2 $AgNO_3$ 2 HNO_3, die wieder in Ionen zerfallen und außerdem NO, das aus der Flüssigkeit entweicht. Dieser Vorgang ist demnach von dem ersten wenig verschieden. Ich betrachte daher den Nernstschen Versuch als eine wesentliche Stütze für meine Ansichten. Dieser kann jedoch entscheidend für diese werden, wenn er quantitativ weiter erforscht wird. Der an der Kathode auftretende Zuwachs an H_2O kann gemessen und dann in Vergleich gesetzt werden zu der Menge Silber, die durch denselben Strom in einem Silbervoltameter ausgeschieden wird. Jedem dort niedergeschlagenen Atom Ag muß ein H_2O entsprechen, das an der Kathode als Zuwachs auftritt. Wird dieser Schluß aus meiner Theorie durch den Versuch bestätigt, dann dürfte ihrer allgemeinen Annahme kaum noch Widerspruch entgegengesetzt werden können.

51 Lodge füllt einen, mit einer Kohlenanode versehenen Zylinder mit einer verdünnten HCl-Lösung, einen zweiten mit Platinkathode mit einer $CuCl_2$-Lösung 1 : 10 und verbindet beide durch eine horizontale Kapillarröhre, angefüllt mit Gelatine, die vor ihrer Erstarrung mit einer NaCl-Lösung 1 : 20 und etwas Phenolphthalein durchtränkt worden ist. Ein in die Anode eingeführter elektrischer Strom findet seinen Weg durch die Kapillarröhre zur Kathode. Vor Beginn des Versuches treten in der Kapillarröhre bereits Veränderungen auf, die durch die Anwesenheit der Gelatine mit bedingt sein dürften. An beiden Enden wird das Phenolphthalein langsam entfärbt, bis nach 25 Stunden die Entfärbung so langsam wird, daß nun mit dem Versuch begonnen wird. Dieser Vorgang wird als Diffusionserscheinung aufgefaßt; er verläuft auch genau so wie die Diffusion in Kapillarröhren nach dem Stefanschen Gesetz vorschreitet. Doch ist er nicht eine reine Diffusionserscheinung, da die Blaufärbung der Kapillarröhre auf der Kathodenseite auf die Bildung von $Cu(OH)_2$ hinweist. Wird nun der elektrische Strom durch den Apparat geleitet, so schreitet die Entfärbung auf beiden Seiten der Kapillarröhre wesentlich schneller fort und nicht mehr nach dem Stefanschen Gesetze. Denn während sie nach diesem der Quadratwurzel aus der Zeit proportional vorrückt, bewegt sie sich nun dieser Zeit direkt proportional; dabei zeigt die Beobachtung, daß der Weg auf der Anodenseite sechsmal so groß ist als auf der Kathodenseite. Jetzt wird diese Entfärbung und ihre Geschwindigkeit auf die Wanderung der Ionen durch den elektrischen Strom zurückgeführt, während die frühere nur auf die Diffusion gestützt wurde. Es ist schwer, den Gedanken zurückzuweisen, daß hier gleichfalls die Diffusion die wirkende Ursache ist. Daß die Entfärbungsgeschwindigkeit unter dem Einfluß des elektrischen Stromes einem anderen Gesetze folgt, als vorher, kann dagegen keinen Einwand bilden, wenn der Strom die Diffusionsvorgänge in der Lösung beeinflußt. Das ist aber der Fall. Denn beim Beginn der Elektrolyse werden die Ionen gerichtet, so daß sie die Ebenen ihrer

rotierenden H_2O-Molekeln einander parallel stellen. Dieser Umstand kann möglicherweise bereits eine Änderung der Diffusionsgeschwindigkeit bewirken. Aber davon abgesehen, ändern die Vorgänge an den Elektroden die gleiche Verteilung der Ionen in der Lösung, an der Kathode, wenn dort das Kation ausgeschieden wird, an der Anode, wenn dort die Anodensubstanz in die Lösung übertritt. Dann muß vom Beginn der Elektrolyse an die Diffusion von der Anode zur Kathode ständig wachsen, bis ein Beharrungszustand eintritt, der bis zur Beendigung der Elektrolyse anhält, worauf allmählich der normale Zustand der gleichmäßigen Verteilung der zurückgebliebenen Ionen wieder gewonnen wird.

Gehen wir nun auf den Versuch von Lodge genauer ein, so ist zunächst zu bemerken, daß der elektrische Strom nur die Cu-Ionen im Kathodengefäß und die Cl-Ionen im Anodengefäß erfaßt; diese bewegen sich gar nicht aus ihren Gefäßen während der Elektrolyse und dringen vor allem gar nicht in die Kapillarröhre ein; nur die Cl-Ionen des Kathodengefäßes und die H-Ionen des Anodengefäßes wandern in diese ein; demnach sind die Bewegungen dieser vom elektrischen Strome gar nicht beeinflußt worden. Dann bleibt als einzige Möglichkeit übrig, die Bewegungen in der Kapillarröhre als Diffusionserscheinungen aufzufassen. Um diese Auffassung zu stützen, verfolgen wir die Wirkungen des elektrischen Stromes. Während vor dessen Einleitung in den Apparat Cu-Ionen in die Kapillarröhre eindringen, was durch die Blaufärbung bezeugt wird, hört beim Beginn des Stromes die weitere Färbung auf und wird durch eine Entfärbung ersetzt. Der Grund liegt darin, daß die Cu-Ionen an der Kathode ihre 4 H_2O abgeben und sich die isolierten Cu gleichzeitig auf der Kathode niederschlagen, so daß die Lösung dort verdünnt wird und außerdem die Cu-Ionen verliert. Dann sorgt die Diffusion für einen dauernden Zustrom von Cu-Ionen nach der Kathode, so daß ein Eindringen solcher in die Kapillarröhre nicht mehr möglich ist. Für das Eindringen von Cl-Ionen in die Kapillarröhre — aber nur durch Diffusion — hat Lodge dadurch vorgesorgt, daß er die $CuCl_2$-Lösung im Kathodengefäße im Verhältnis 1 : 10 verdünnt hat, die NaCl-Lösung dagegen im Verhältnis 1 : 20, daß demnach die Cl-Ionen im Kathodengefäß dichter sind als in der Kapillarröhre und daher von selbst in diese eindringen. Auch in dem Anodengefäß sind Cl-Ionen, deren Dichtigkeit von dem nicht bekanntgegebenen Verdünnungsgrade der Salzsäure abhängt. Doch scheint diese, nach dem Verhalten der Cl-Ionen vor der Elektrolyse zu urteilen, nicht sehr groß gewesen zu sein. Sowie der Strom eingeleitet wird, werden durch ihn im Anodengefäß Cl-Ionen von ihren H_2O freigemacht. Die entionisierten Cl legen sich zu Molekeln Cl_2 zusammen und entweichen als solche aus der Lösung: dann strömen nach der Anode fortwährend Cl-Ionen hin, so daß diese gar keine Gelegenheit finden, in die Kapillarröhre zu dringen; im Gegenteil ist eher ein Nachströmen der in der Kapillarröhre vorhandenen Cl-Ionen nach der Anode zu erwarten. Die H-Ionen im Anodengefäß ändern ihre Anzahl nicht: dadurch wird ihr Streben, ein Verteilungsgleichgewicht zu gewinnen, sie immer weiter in die Kapillarröhre eindringen und das Phenolphthalein entfärben lassen. Nach dieser Auffassung sind die Vorgänge des Lodgeschen Versuches allein auf Diffusionswirkungen zurückzuführen, sowohl vor wie während der Elektrolyse, vor derselben, weil in dem ganzen System kein Verteilungsgleichgewicht der Ionen vorhanden war, während derselben, weil der elektrische Strom durch seine primären und sekundären Wirkungen die ungleiche Verteilung dauernd verstärkte.

52 Eine Folgerung, die aus meiner Auffassung zu ziehen ist, ist die, daß durch den elektrischen Strom H_2O dauernd an der Kathode ausgeschieden

wird, dagegen an der Anode dauernd verschwindet. Dieser Vorgang muß durch Versuche nachzuweisen sein und ist auch längst bekannt. Man findet ihn in den Methoden, die Konzentration von Säuren durch den elektrischen Strom zu bewirken. Besonders haben sich die Versuche auf H_2SO_4 erstreckt, da die älteren Wege, aus verdünnter Säure konzentriertere zu gewinnen, recht kostspielig sind. Aber soweit der elektrische Strom benutzt wird, wird nicht die ganze Menge verdünnter Säure durch ihn konzentriert, sondern nur ein Teil, der Wasser verliert auf Kosten des anderen, der noch verdünnter wird. Das steht aber ganz in Übereinstimmung mit meiner Auffassung von der Beschaffenheit des elektrischen Stromes. Die bisherige Auffassung sieht in der Konzentration eine primäre Wirkung des Stromes, neben welcher die andere primäre Wirkung der Ausscheidung von H an der Kathode einhergeht, und steht daher, im Grunde genommen, mit dem Faradayschen Gesetze nicht im Einklang. Es dürfte daher nicht ohne Interesse sein, die Vorgänge bei diesem Versuche nach meiner Ansicht darzulegen.

Zunächst ist darauf hinzuweisen, daß der Kathodenraum der elektrolytischen Zelle durch eine vertikale Membran von dem Anodenraum getrennt ist. Die Membran hat nur die Aufgabe, den Ausgleich der Veränderungen, die der Strom in den beiden Räumen verursacht hat, möglichst zu verlangsamen. Vor Beginn der Elektrolyse sind die SO_4-Ionen und H-Ionen durch die ganze Flüssigkeit gleichmäßig verteilt, wobei an jedem SO_4 4 H_2O und an jedem H 2 H_2O haften. Während der Strom an der Anode 1 SO_4 entionisiert, also die 4 H_2O freimacht, entionisiert er an der Kathode 2 H-Ionen, macht demnach gleichfalls 4 H_2O frei, während die beiden Atome H sich zu 1 Molekel H_2 vereinigen und als Gas aus der Lösung entweichen. An der Anode entreißt das Radikal SO_4 einer H_2O-Molekel 2 H, um eine Molekel H_2SO_4 zu bilden, während das Atom O mit einem in gleicher Weise abgesonderten O zu einer Molekel O_2 zusammentritt, die als Gas gleichfalls entweicht. Die Molekel H_2SO_4 löst sich unter Aufnahme von 8 H_2O in 1 SO_4-Ion und 2 H-Ionen auf. Dann sind an der Kathode an Stelle von 2 H-Ionen 4 H_2O-Molekeln getreten, an der Anode durch die Entionisierung von 1 SO_4 4 H_2O frei geworden, bei der Bildung von H_2SO_4 1 H_2O gesetzt und bei der Umwandlung von H_2SO_4 in Ionen 8 H_2O der Lösung gebunden, so daß das Anodengefäß 5 freie H_2O verloren hat. Dafür sind an Stelle des vom Strome erfaßten SO_4-Ions ein neues und außerdem 2 H-Ionen getreten, was einen Zuwachs von 2 Ionen bedeutet. Nun hat ein Ion dieselbe mittlere kinetische Energie wie ein H_2O und beansprucht auch annähernd denselben Raum für seine Bewegung. Dann sind an der Kathode infolge der Stromwirkung zwei neue, gleichen Raum erfüllende und gleiche Stoßkraft besitzende Gebilde getreten, während an der Anode deren drei verschwunden sind. Demnach muß sich auf der Kathodenseite ein Volum- und Druckzuwachs zeigen, an der Anode eine $1^1/_2$mal so große Abnahme. Da die Membran den sofortigen Ausgleich von Volum und Druck erschwert, wird während der Elektrolyse Volum- und Druckdifferenz dauernd steigen, was durch die Versuche auch bestätigt wird. Während so ein hydrostatischer Überdruck von der Kathode nach der Anode geht, tritt zugleich eine Diffusionsbewegung der H_2O von der Kathode nach der Anode und der H-Ionen von der Anode nach der Kathode auf, während die SO_4-Ionen infolge der gleichbleibenden Verteilung in der Lösung keinen Anlaß zu einer Diffusionsbewegung geben.

Die Diffusion der H_2O nach der Anode wirkt der Konzentration der Schwefelsäure entgegen: und je mehr H_2O an der Kathode frei geworden sind, desto stärker wird diese Diffusionswirkung: das heißt aber: der Zuwachs der Konzentration muß allmählich abnehmen und schließlich gleich Null werden,

wenn nämlich die Bindung der H_2O an die Atome H im Anodengefäß gleich dem Zuwachs der H_2O infolge der Diffusion wird. Dann tritt ein stationärer Zustand ein. Der elektrische Strom wird zwar weiter H_2 und O_2 als Gase ausscheiden, aber die Konzentration der Schwefelsäure nicht vergrößern. Sollte daher dieser Weg, aus verdünnter Schwefelsäure konzentriertere zu gewinnen, eine technische Bedeutung erhalten, so müßten Einrichtungen getroffen werden, einerseits den hydrostatischen Überdruck an der Kathode zu beseitigen, etwa durch Absaugen von Flüssigkeit aus dem Kathodengefäß, und anderseits eine trennende Membran zu finden, die Wasser schwer durchläßt.

Diese Darlegung zeigt auch den Weg, meine Vorstellung nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ auf ihre Übereinstimmung mit den Vorgängen in der Natur zu prüfen. Im ersten Augenblick der Elektrolyse kommt weder ein Überdruck noch eine Diffusionsbewegung zustande. Würden beide überhaupt fehlen, so müßte die Konzentration der Schwefelsäure proportional der Zeit wachsen, natürlich nur so lange, als noch genügende Mengen von einzelnen H_2O-Molekeln in dem Anodengefäß vorhanden sind. Da der hydrostatische Druck wie die Diffusionsbewegung der H_2O und der H-Ionen mit der Zeit wächst, so muß der Konzentrationszuwachs im Anodengefäß mit der Zeit abnehmen, bis der stationäre Zustand eintritt. Diese Abnahme läßt sich mit Hilfe von Versuchen, die verschieden lange Zeit dauern, sonst aber unter gleichen Bedingungen stattfinden, verfolgen; und die genaue Bestimmung der Zusammensetzungen der Lösungen im Anoden- und Kathodengefäß kann die Gesetze, nach welchen diese Zusammensetzung bestimmt wird, in Gestalt einer Formel festlegen. Diese ist dann darauf zu prüfen, ob meine Vorstellung mit ihr zu vereinigen ist.

53 Der wesentliche Unterschied zwischen meiner Auffassung und der herrschenden ist der, daß nach der meinigen die festgestellten Verlagerungen nur von der Diffusion verursacht werden und daher nur bei solchen Ionen beobachtet werden können, deren Verteilungsgleichgewicht innerhalb der Lösung durch primäre oder sekundäre Aktionen des elektrischen Stromes gestört worden ist. Bleibt bei der Elektrolysierung einer Kupfersulfatlösung zwischen Cu-Elektroden die Verteilung der SO_4-Ionen unverändert, so gibt es für diese keine Überführungszahl. Die herrschende Ansicht schreibt den Ionen eine, ihnen inhärierende, nur mit der Temperatur veränderliche Überführungszahl zu, z. B. für SO_4-Ionen bei 18° 0,644, die demnach völlig unabhängig ist von einer anderen Verteilung der Ionen infolge des elektrischen Stromes. Da nun die Erfahrung lehrt, daß eine Veränderung dieser Verteilung eine Diffusionsbewegung auslöst, so liegt der herrschenden Vorstellung die stillschweigende Voraussetzung zugrunde, daß die Gesetze der Diffusion während der Elektrolyse aufgehoben sind. Dies ist aber eine unhaltbare Annahme.

Wenn meine Auffassung richtig ist, muß die Hittorfsche falsch sein, ebenso wie die von Kohlrausch, die durch die Formel $\lambda \infty = u + v$ dargestellt ist, wo $\lambda \infty$ die Leitfähigkeit einer sehr verdünnten Lösung darstellt. Nun hängt nach meinen Darlegungen im letzten Abschnitt die Leitfähigkeit des elektrischen Stromes in einer Lösung im wesentlichen von der Längswucht der elektrischen Energie ab, dagegen die chemische Zersetzung von der Drehwucht, während der Widerstand nichts anderes ist als die Schraubenenergie, die beim Durchfließen des Stromes in Wärme und andere Arbeit umgesetzt wird und demnach als elektrische Energie verschwindet. Dann können λ und u und v in gar keinen unmittelbaren Zusammenhang gebracht werden. Daß hier eine große Unklarheit in der Auffassung der physika-

lischen Vorgänge vorliegt, kann man daraus erkennen, wie die besprochene Formel abgeleitet wird. Kohlrausch behauptet, daß das $\lambda\infty$ eines Elektrolyten sich aus zwei Konstanten additiv zusammensetze, ohne seine Ansicht als allgemein richtig nachzuweisen. In welchem beschränkten Sinne die Addition verschiedener λ als sachgemäß angesehen werden kann, soll gleich erörtert werden. Nun folgert Kohlrausch ganz allgemein, daß diese additiven Größen nichts anderes sein können, als die Hittorfschen Wanderungsgeschwindigkeiten u und v der Ionen. Die Größen einer Gleichung müssen alle von derselben Benennung sein. Sind nun u und v Geschwindigkeiten, so muß auch λ eine solche sein, ist es aber nicht als der reziproke Wert eines Widerstandes. Faßt man λ aber als Geschwindigkeit auf, so muß sie eine Richtung haben, die sich von der Anode zur Kathode erstrecken dürfte. Die Hittorfsche Vorstellung gibt u und v entgegengesetzte Richtung; demnach muß λ, wenn es sich aus beiden zusammensetzte, gleich $\pm$ (u — v) sein. Und da nach meinen früheren Darlegungen die Formel $\frac{u}{v} = \frac{n}{n-1}$ nicht richtig ist, so kommt den aus beiden Formeln berechneten u und v eine reale Bedeutung nicht zu.

Nun hat man die so berechneten u und v von Salzlösungen dazu benutzt, das λ anderer Salzlösungen zu berechnen und diese λ mit den durch Beobachtung gefundenen Werten als nahe übereinstimmend ermittelt und daraus auch den u und v einen realen Wert zugesprochen. Aber dieser Schluß ist nicht berechtigt, wenn 1. u und v nicht nur Funktionen der Temperatur t sind, sondern auch von den primären und sekundären Vorgängen in der Lösung abhängen und wenn 2. die Hittorfschen Zahlen z. B. für SO_4-Ionen falsch sein müssen. Wenn trotzdem Berechnung und Beobachtung zusammenfallen, so kann dies für den Fall begreiflich werden, daß u, bzw. v und λ Diffusionsgeschwindigkeiten sind, die ja selbstverständlich Funktionen der Temperatur sind.

Als besonders beweiskräftig hat man die Tatsache angesehen, daß die Differenzen der Leitfähigkeiten zweier Salzlösungen, die dasselbe Säureradikal, aber verschiedene Metalle erhalten, bei Änderung des Säureradikals oder Hydroxydes, aber unter Beibehaltung derselben Metalle annähernd dieselbe Größe beibehalten. So hat man festgestellt, daß

$\lambda KCl - \lambda NaCl = 19$ und ferner $\lambda KNO_3 - \lambda NaNO_3 = 12$ ist.
$\lambda KOH - \lambda NaOH = 20$ $\lambda KClO_3 - \lambda NaClO_3 = 14$

Dann werden 19 und 20 als gleiche Zahlen angesehen und ebenso 12 und 14, obwohl im ersten Falle die zweite um 5 Prozent, im zweiten um $16^2/_3$ Prozent höher ist als die erste, und man kommt dann zu den Gleichungen: $\lambda KCl - \lambda NaCl = \lambda KOH - \lambda NaNO_3$; und $\lambda KClO_3 - \lambda NaClO_3 = \lambda KNO_3 - \lambda NaNO_3$ und wenn man die Glieder mit negativem Zeichen auf die andere Seite bringt, hat man: $\lambda KCl + \lambda NaOH = \lambda NaCl + \lambda KOH$ und $\lambda KClO_3 + \lambda NaNO_3 = \lambda KNO_3 + \lambda NaClO_3$ und die Leitfähigkeiten treten als additive Größen auf, aber nur für Salze und Laugen, die zwar aus denselben Radikalen und Metallen gebildet sind, aber doch derart, daß auf jeder Seite 2 Leitfähigkeiten von Verbindungen stehen, die weder ein Metall noch ein Radikal gemeinsam haben. Damit ist aber in keiner Weise bewiesen, daß die Wanderungsgeschwindigkeiten der Ionen allgemein als additive Größen auftreten.

Nach meiner Auffassung sind die Vorgänge in der Lösung infolge der elektrolytischen Einwirkung als Diffusionserscheinungen anzusehen; und es fragt sich, wie diese in den Lösungen mit gleichem Radikal, aber verschiedenen Metallen oder mit gleichem Metall, aber verschiedenen Radikalen verlaufen. Während eine Zuckerlösung nur aus Wasser und flüssigen Zucker-

molekeln besteht, finden sich in einer Salzlösung neben dem Wasser noch zwei Lösungsstoffe, nämlich die Anionen und Kationen. Man kann daher eine Kochsalzlösung in dreifach verschiedener Weise auffassen, einmal als eine Lösung von Cl-Ionen und Na-Ionen in Wasser oder als eine Lösung von Cl-Ionen in dem Lösungsmittel Wasser + Na-Ionen oder als eine Lösung von Na-Ionen in dem Lösungsmittel Wasser + Cl-Ionen. Haben nun zwei Salzlösungen dieselbe Säure, z. B. K_2SO_4 und Na_2SO_4, so kann man sie auffassen als Lösung der K- bzw. Na-Ionen in dem Lösungsmittel Wasser + SO_4-Ionen, und in gleicher Weise die Salzlösungen von KNO_3 und $NaNO_3$ als solche in einer Lösung von Wasser + NO_3-Ionen. Ist nun die Diffusionsgeschwindigkeit von K in einer Lösung größer als die von Na, so ist zu vermuten, daß dies für ein Lösungsmittel mit SO_4-Ionen ebenso gilt als für ein solches mit NO_3-Ionen, indem die Diffusionsgeschwindigkeit im wesentlichen als von der konstruktiven Beschaffenheit des Ions abhängig angenommen wird. Natürlich wird auch das Lösungsmittel einen bestimmten Einfluß besitzen, der aber als schwächer anzusetzen ist. Dann wird die Differenz der Diffusionsgeschwindigkeiten der K- und Na-Salze in Lösungen mit demselben Anion annähernd den gleichen Wert besitzen, welches Anion sich auch in der Lösung befindet, und die Abweichungen von diesem Werte werden dem Einfluß des in dem Lösungsmittel enthaltenen Anions zuzuschreiben sein.

Inwieweit die Kohlrauschschen Messungsergebnisse durch die vorliegende Auffassung verständlich gemacht werden können, dürfte einer Untersuchung wert sein. Auch läßt sich die Frage aufwerfen, ob die Diffusion eines K-Ions in einem Lösungsmittel mit SO_4-Ionen dieselbe Geschwindigkeit zeigt wie die eines SO_4-Ions in einem Lösungsmittel mit K-Ionen. Bei der ersten Überlegung wird man beide als gleich anzunehmen geneigt sein. Aber in dem ersten Falle sind die SO_4-Ionen in dem Lösungsmittel gleichmäßig verteilt, während die ungleich verteilten K-Ionen einer gleichen Verteilung zustreben und darin durch die Bewegungen der SO_4-Ionen gehemmt werden; im anderen Falle sind die K-Ionen gleichmäßig verteilt, während die ungleich verteilten SO_4-Ionen einer gleichen Verteilung zustreben und darin durch die Bewegungen der K-Ionen gehemmt werden. Demnach kann nur durch Versuche die Frage entschieden werden.

Indem so meine Auffassung den Anlaß gibt, die Vorstellungen der Wissenschaft, die durch Hittorfs und Kohlrauschs Arbeiten veranlaßt sind, einer sorgfältigen Nachprüfung zu unterwerfen bis zur Entscheidung, ob sie überhaupt haltbar sind und was gegebenenfalls von ihnen bestehen bleiben kann, legt sie gleichzeitig viele neue Versuche nahe, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen werden soll.

5. Abschnitt.

Die Vorgänge in den Muskeln und Nerven.

54 Der Sitz der Muskeltätigkeit sind die Zellen der Muskelfasern. Die einzelne Faser besteht aus einer Reihe gleichliegender, hintereinander geordneter Zellen, deren jede von einer Zellhaut umschlossen ist. Um Arbeit leisten zu können, muß in ihnen vorher Energie aufgespeichert worden sein, die fähig ist, in freie Energie überzugehen. Diese wird mit der flüssigen Nahrung als den Trägern dieser Energie durch das Blut aus den Reservebehältern des Körpers zugeführt. Das Protoplasma bringt sie zunächst wieder in eine unlösliche Form, wozu es durch die leichte Verschiebbarkeit seiner Teile und die damit verknüpfte leichte Aufnahme und Abgabe von Stoffen

besonders geeignet ist. Die so in den einzelnen Zellen während der Ruhezeit des Muskels angesammelte Nahrung wird durch einen Nervenreiz auf das Protoplasma wieder löslich gemacht. Sie bildet dann nach der vorliegenden Auffassung mit der Zellflüssigkeit Großmolekeln und macht dadurch Energie in Form von Schraubenwucht frei, die sich aus Längs- und Drehwucht zusammensetzt. Welches die Kerne dieser Großmolekeln sind, ob sie sauren oder basischen Charakter haben oder aus welchen anderen Gebilden organischer Natur sie bestehen, das zu ermitteln, wird Aufgabe der Zellphysiologie sein. Diese freie Energie leistet die Muskelarbeit.

Wenn die aufeinander folgenden Zellen einer Muskelfaser alle gleich geordnet sind, so ist zu erwarten, daß auch die entstehenden Großmolekeln gleichgerichtet und deren Längswuchten alle dieselbe Richtung, parallel den Muskelfasern haben und deren Drehwuchten alle senkrecht zu ihr in demselben Sinne wirken. Die Längswuchten suchen, die eigene Zelle zu strecken, die Drehwuchten, sie senkrecht zur Zellachse auszubauchen. Beide Wuchten wirken daher einander entgegen. Da aber nach der Entstehung der Großmolekel ihre Drehwucht die Längswucht überwiegt, so wird die Ausbauchung und die dadurch bedingte Verkürzung die Längsstreckung überwinden; und die Folge wird eine Verkürzung der Muskelzelle sein, die aber passiv eine Folge der Ausbauchung ist. Die ganze Längswucht und ein ihr entsprechender Teil der Drehwucht wird dadurch in Wärme umgesetzt und bildet die verlorene Arbeit der Muskelzellentätigkeit. Daß die Muskelzelle ebensowenig eine ideale Maschine ist wie die Dampfmaschine, ist längst festgestellt worden. Aber während man bei der letzteren die Gründe für die Mängel bald eingesehen hat, steht man bis jetzt vor der ersteren wie vor einem Rätsel. Die neue Auffassung ist geeignet, dieses Rätsel zu lösen und auch Wege aufzusuchen, auf welchen man aus dem angegebenen Mechanismus die verlorene Arbeit berechnen und mit der beobachteten vergleichen kann.

Wenn nun in den sämtlichen Zellen einer Muskelfaser durch Nervenreize gleichzeitig Großmolekeln gebildet werden, so werden auch sämtliche Zellen in der Länge verkürzt und in der Breite gedehnt; und wenn das gleiche in allen Fasern des Muskelbündels vor sich geht, so wird der ganze Muskel in der Länge verkürzt und schwillt in der Breite an, wie ja auch jede Beobachtung zeigt. Die Verkürzung überträgt die freie Energie der sämtlichen Großmolekeln auf den mit dem Muskel verbundenen einarmigen Knochenhebel und bewirkt die Verlagerung der am Ende des Hebelarms befindlichen Masse. Die im Muskel erzeugte Wärme wird von der Blutwelle nach anderen Teilen des Körpers übertragen.

Ist die dargelegte Auffassung richtig, so muß der Muskel Einrichtungen haben, die verhindern, daß die Schraubenenergie, ohne Arbeit zu leisten, die Zelle verläßt. Diese Aufgabe darf wohl zunächst der umschließenden Zellhaut zugeschrieben werden; und es ist zu prüfen, durch welche Einrichtungen sie sie erfüllen kann. Sollten die Zellen einer Muskelfaser nicht überall dicht abschließen, was als eine Krankheitserscheinung aufzufassen wäre, so würde die Energie die Faser verlassen und auf die Sehne übertreten. Vielleicht ist ein derartiger Zustand die Ursache von Sehnenentzündungen, so daß deren Ursprung nicht unmittelbar in der Sehne, sondern in dem entsprechenden Muskel zu suchen wäre.

Nun hat Dubois-Reymond berühmt gewordene Untersuchungen über die Muskelelektrizität angestellt, die als klassisch angesehen werden. Ihm ist es gelungen, durch Einsetzen von Sonden in die Muskelfaser elektrische Spannungen am Elektroskop nachzuweisen. Damit scheint aber in Widerspruch zu stehen, daß der gesunde Muskel die elektrische Energie nicht un-

mittelbar nach außen abgeben soll, es sei denn, daß der berühmte Forscher entweder mit nicht gesunden Muskeln gearbeitet hat oder daß die beiden voneinander getrennten Spitzen der Sonde in dieselbe Muskelzelle getaucht wären und dadurch natürlich die elektrische Spannung, d. i. die kinetische Energie der Großmolekeln zum Galvanoskop geleitet hätten. Doch ist noch mit der weiteren Möglichkeit zu rechnen, daß nämlich die beiden Spitzen der Sonde in zwei nahe zusammenliegende Zellen getaucht sind, die zwischen den Spitzen liegenden Zellen durch den mechanischen Eingriff verletzt wurden und dadurch die Schraubenenergie entweichen ließen. Es dürfte daher der Mühe wert sein, die Dubois-Reymondschen Versuche unter diesem Gesichtspunkte zu wiederholen und zweckentsprechend zu erweitern.

56 Nun kann es auch für bestimmte Tiere ganz zweckmäßig sein, daß die Zellhaut der Aufgabe, zu isolieren, ganz enthoben wird und daß die ganze Energie aller Zellen eines Muskels als Schraubenwucht auf einmal abgegeben wird. In der Tat ist diese Einrichtung in den elektrischen Organen bestimmter Fische anzutreffen. Morphologisch ist dieses Organ ein umgebildeter Muskel. Wenn früher diese Umwandlung als etwas Auffälliges erschien, so wird sie etwas Natürliches auf Grund der entwickelten Vorstellung. Die Abweichung in dem Bau der Zellen von denen eines normalen Muskels ist jetzt darauf zu prüfen, ob sie die allmähliche Aufspeicherung der Energie wie auch ihre plötzliche Entladung besonders gut zu bewirken imstande ist. Daß dieses Organ bei Fischen ganz verschiedener Ordnungen ausgestaltet worden ist, ist nun nicht mehr verwunderlich, da die Anlage dazu bei den meisten Fischen vorausgesetzt werden darf. Viel eher muß es befremden, daß es bei so wenigen Fischen anzutreffen ist. Aber es wird nur dort zu erwarten sein, wo die Fische einen besonderen Nutzen davon haben. Nun wird das elektrische Organ auf Kosten eines Muskels gewonnen, so daß mit seiner Bildung die freie Bewegung des Tieres beschränkt wird. Daher wird man es nur bei Fischen finden, die in irgend einer Weise an der schnellen Bewegung behindert sind. Wer auf die freie Bewegung im Wasser angewiesen ist, wird keinen Grund haben, sich um einen Muskel zu schwächen, der ihn vor seinen Feinden ebenso sicher zu schützen vermag, wie es ihm erleichtert, seine Beute zu erhaschen. Nun leben die Zitteraale, -welse und -rochen im Schlamme, von welchem Versteck sie die Beute erspähen. Naht sich ein Opfer in dem klaren Wasser über dem Schlamme, so würden sie zu viel Zeit verlieren, um ins klare Wasser zu kommen und die Verfolgung aufzunehmen. Dagegen wirkt die, im elektrischen Organ aufgespeicherte Energie, plötzlich auf einmal entladen und auf einer kurzen Wasserstrecke übertragen, auf die Muskeln der Beutetiere lähmend; so kann sich der Zitterfisch seiner Beute leicht bemächtigen.

57 Die Nervenzellen gelten als umgewandelte Muskelzellen und gleichen besonders den Zellen des elektrischen Organs. Bei niederen Tieren trifft man Neuromuskelzellen an, die also noch nicht differenziert und als gemeinsamer Ursprung der Nerven- und Muskelzellen anzusehen sind. Mit der Bildung des Muskels mußten gleichzeitig Nervenzellen und Nervenfäden entstehen, die den Reiz zu den Muskeln übertragen und dort den chemisch-mechanischen Vorgang auslösen konnten. Diese Übertragung mußte schnell bewirkt werden und durfte sich daher nicht auf einen Hebelmechanismus stützen. In der Form von Wärme wäre sie ebenfalls zu langsam erfolgt; dagegen ist eine solche als Schraubenwucht mit großer Längswucht als besonders geeignet anzusehen; man darf daher vermuten, daß sie, wie in den Muskeln, auch in den Nerven das treibende Agens ist. Die in den Ganglien freigemachte Nervenenergie hat eine größere Längswucht und durchjagt auf

ihre Kosten den Nervenfaden, um die kleine Drehwucht zur Muskelzelle zu tragen, wo sie die dort aufgespeicherte Großmolekelenergie freimacht. Solange die Nervenzellen neue Reize zu den Muskeln senden, wird dieser Arbeit leisten, vorausgesetzt, daß der Nahrungsvorrat, aus dem die Großmolekeln gebildet werden, dazu ausreicht. Nach dem Aufhören dieser Reize geht der Muskel in die Ruhelage zurück und speichert von neuem aus dem, nahrungzuführenden Blute Reservestoffe auf. Hierzu bedarf es keinen neuen Reizes; oder man kann auch sagen: das Aufhören des Nervenreizes wirkt als Reiz, um die frühere, rein der Selbsterhaltung dienende Tätigkeit wieder aufzunehmen.

Zu dem Falle, daß der Reiz einer Nervenzelle zu einer Muskelzelle übertragen wird, gesellt sich der Verlauf des Reizes von Nervenzelle zu Nervenzelle. Schon bei der Auslösung einer Muskelbewegung geht der Reiz von vielen Gehirnzellen zu allen Nervenzellen, die den Muskel regieren und wird von diesen erst an alle Muskelzellen übermittelt. Dann müssen diese Gehirnganglien untereinander in Verbindung stehen. Ferner sind alle Nervenzellen der Sinnesorgane mit bestimmten Nervenzellen des Gehirns verknüpft, so daß die Ganglien der Sinnesorgane im Gehirn lokalisiert sind. Dort sind die einzelnen Ganglien mit bestimmten anderen durch Nervenfäden verknüpft. An jedes Ganglion ist eine Vorstellung geknüpft, die dem Menschen bewußt wird, wenn ein Reiz das Ganglion trifft. Fließt ein Reiz von einem Ganglion zum anderen, so werden die Vorstellungen beider miteinander verbunden: es entsteht ein Gedanke. Zwischen den Ganglien nicht zusammengehöriger Vorstellungen besteht keine Verbindung durch Nervenfäden. Sollte sie früher einmal bei unseren Vorfahren bestanden haben, so ist sie, nachdem die falsche Verknüpfungsart erkannt ist, etwa die Verbindung des Gewitters mit einem Gott Thor, durch Nichtbenutzung des Verbindungsweges unwegsam geworden und bei den nachfolgenden Generationen ganz verschwunden. So werden Ganglienverknüpfungen, die zu Gedanken führen, die mit der Wirklichkeit in Widerspruch stehen, auf Grund der wachsenden Erfahrung mit der Zeit von selbst aufgehoben. Das Gehirn des Einzelnen ist im allgemeinen konform mit seiner Erkenntnis der Welt.

Geht ein Reiz von einem Ganglion über eine Reihe anderer zu einem zweiten, so werden durch ihn die zu einem Gedanken vereinigten Vorstellungen dieser spezialisiert. Der Gedanke ist weniger allgemein. Diese besonderen Vorstellungen und Gedanken sind die ursprünglichen gewesen. Wird das Anfangs- und Endganglion auf verschiedenen Bahnen über andere Ganglien miteinander verbunden, so wird der durch Reize hervorgerufene Gedanke schon ein allgemeinerer. Werden aber anderseits aus einer Gedankenbahn mehr und mehr Ganglien ausgeschaltet, so wird der entsprechende Gedanke immer allgemeiner und am allgemeinsten, wenn zwischen den beiden Ganglien eine unmittelbare Verbindung hergestellt ist, die gangbarer als alle mittelbaren ist.

58 Zwingen die Beobachtungen in der Welt zur Bildung eines neuen Gedankens, so ist ein Nervenfaden zu bilden, der über alle Ganglien läuft, deren Vorstellungsinhalt mit dem neuen Gedanken in Verbindung steht. Zwischen vielen dieser Ganglien bestehen schon Verbindungsfäden; nur an wenigen Stellen, schließlich nur an einer einzigen fehlt die Verbindung noch. Infolge der beim Nachdenken verursachten Reize senden die noch unverbundenen, aber benachbarten Ganglien Fäden aus. Falls diese sich berühren und ineinander münden, ist die Möglichkeit gegeben, den Reiz durch die ganze Kette zu übertragen, wenn er hinreichend stark ist, den neugebildeten schwachen Verbindungsfaden ganz zu durchlaufen: dann ist der

neue Gedanke geschaffen, aber noch nicht befestigt. Die geschlossene Verbindung kann wieder zerreißen, zumal wenn in dem Kopfe des Nachdenkenden die Gedanken sich jagen und fortwährend andere Gedankenverbindungen entstehen, die die Kette der neuen Gedankenverbindung wieder zerstören. Kommt später derselbe Gedankenfluß von neuem zustande, dann kann es das Glück bringen, daß die Brücke zwischen den beiden Ganglien noch einmal hergestellt wird und der neue Gedanke wieder im Bewußtsein erscheint. Jetzt ist schon im voraus die Aufmerksamkeit auf ihn gerichtet, so daß er aufgeschrieben wird und dadurch immer neu produziert werden kann; zugleich wird der Verbindungsfaden immer gangbarer. Aber der neue Gedanke ist noch an viele besonderen Vorstellungen geknüpft, so daß er als allgemeiner noch nicht in Anspruch genommen werden kann. Die Prüfung an der Wirklichkeit, ob die Verallgemeinerung überhaupt statthaft ist, spricht oft das Todesurteil über den Gedanken selbst aus.

Ein neuer Gedanke hat ebenso wie ein organisiertes Wesen, einen Kampf ums Dasein zu führen. Als ein sicherer Besitz der Wissenschaft kann er nur dann angesehen werden, wenn er drei Bedingungen erfüllt. Er muß erstens übereinstimmen mit den Ermittelungen der Wissenschaft, sowohl mit denen, die vor dem Lebendigwerden des Gedankens bekanntgeworden sind, wie mit denen, die zu seiner Prüfung nachher gemacht werden. Zweitens muß untersucht werden, ob er in Übereinstimmung steht mit den bisher als zum sichersten Besitz der Wissenschaft gezählten Erkenntnissen. Fehlt diese Übereinstimmung, so ist er noch nicht zu verwerfen, da die bisherigen Ergebnisse der Wissenschaft ganz oder teilweise auf einem Irrtum beruhen können. Aber wenn er mit den allgemeinsten Erkenntnissen z. B. in der Physik, mit den allgemeinsten Naturgesetzen in Widerspruch steht, so ist eine genaue Prüfung notwendig, ob die neue Erkenntnis sich behaupten kann und demnach die alte zu verwerfen ist oder ob das Gegenteil der Fall ist. So steht z. B. die Einsteinsche Relativitätstheorie mit dem Gesetz der geometrischen Zusammensetzung zweier Geschwindigkeiten in Widerspruch, da sie sich auf die Annahme stützt, daß sich die Geschwindigkeit der Erde nicht mit der des Lichtes zu einer resultierenden zusammensetzt. Drittens muß von dem neuen Gedanken verlangt werden, daß es einfach vorstellbar ist. Der Newtonschen Gravitationstheorie liegt die Vorstellung zugrunde, daß der Sitz der Anziehungskraft der Erde im Massenmittelpunkt der Erde ruht, während die Wirkung sich am fallenden Apfel an der Erdoberfläche, ferner in der Bahnbewegung des Mondes und auch an entfernteren Punkten des Weltalls zeigt. Es gibt keine mechanische Vorstellung, mit der diese Annahme verständlich gemacht werden kann, während die Annahme, daß Stöße irgendwelcher Art in der Richtung nach dem Massenmittelpunkte der Erde die Fallbewegung verursache, eine klare Vorstellung liefern würde. Solange diese nicht gewonnen ist, ist das Gravitationsgesetz nicht begriffen. Sie zu gewinnen, muß jedoch das Ziel der Wissenschaft sein, da ihre Aufgabe immer darin bestanden hat, die als unklar erkannten Vorstellungen und Begriffe durch klare zu ersetzen.

59 Ein neuer Gedanke wird entweder in einem Gehirn allein gebildet, wie Newtons Gravitationsauffassung, oder entsteht fast gleichzeitig in mehreren Köpfen unabhängig voneinander, das letztere besonders in dem Falle, daß die Wissenschaft die Schwächen einer geltenden Auffassung erkannt hat und demnach nach einer neuen sucht. Durch Vorträge, Vorlesungen, Bücher wird dieselbe weiter verbreitet. Je heftiger sie bekämpft wird, um so schneller dehnt sie sich aus. Durch Stillschweigen wird sie erdrückt, um erst viel später zur Anerkennung zu kommen. In jedem Gehirn, das den Gedanken

aufnimmt, muß die entsprechende Verbindung zwischen den Ganglien hergestellt werden, deren gleichzeitige Reizung die Vorstellungen erweckt, die in dem Gedanken vereinigt werden. Je häufiger der Gedanke reproduziert wird, um so gangbarer wird der Weg durch den Verbindungsfaden; und um so leichter gestaltet sich die Bildung des Gedankens. Nicht jeder wird anfangs imstande sein, den neuen Gedanken richtig zu erfassen. Es wird dazu meist eine nicht unbedeutende Kenntnis der Wissenschaft verlangt. Aber von denen, die über diese Kenntnisse verfügen, werden am ersten die jungen Gelehrten sich dem neuen Gedanken zuwenden, da sie noch nicht die Fülle des Wissens in sich aufgespeichert haben, dessen Menge den allgemeinen Überblick erschwert. Nebenbei bemerkt, wird auch dem Schöpfer des neuen Gedankens eine gewisse Einseitigkeit seiner Kenntnisse förderlich sein, da auch ihn die Fülle derselben leicht verwirren kann. Bei den sogenannten Autoritäten sind die Bahnen ihrer bisherigen Gedanken so gangbar geworden, daß die Reize der Ganglienzellen immer in diesen so gangbaren Bahnen verlaufen, so daß eine Gedankenbildung, die gegen die bisherige Lehre gerichtet ist, gar nicht möglich wird. So ist es verständlich, daß jede neue Lehre in diesen Koryphäen ihre stärksten Widersacher findet. Ich brauche nur an Cuvier zu erinnern, den Bekämpfer von Lamarck, und an Berzelius, dessen Einfluß in der Wissenschaft erst gebrochen werden mußte, um die moderne Auffassung der Atomverkettung in den festen Salzen zur Anerkennung zu bringen. Ebenso fand Robert Mayer nur bei den jüngeren Gelehrten, Helmholtz, Clausius, schnelles Verständnis. Auch das Ostwaldsche geistige Trägheitsgesetz, das ich in dem dritten Abschnitt erwähnte, findet hierin seine Erklärung, verschont aber seinen Urheber nicht vor der Anwendung auf ihn selbst.

Wenn so die ältere Generation dem neuen Gedanken hindernd im Wege steht und nur die jüngere ihn teilweise fördert, so muß er die allgemeine Anerkennung durch seinen inneren Wert erkämpfen, teils durch die Zurückweisung scheinbarer Einwände, teils durch Beseitigung von Mißverständnissen und besonders durch die genaue Feststellung des Gültigkeitsbereichs. Wenn dieser anfangs unterschätzt wird, wird er in der Folge meist überschätzt und erst nachher auf das Gebiet seiner vollen Herrschaft eingeschränkt. Während er zuerst nur zugleich mit einer Reihe von Nebenvorstellungen, durch deren Vermittlung er anfangs geboren wurde, reproduziert wird, wird er im Laufe der Zeit von deren notwendigem Mitanklingen befreit. Diese Tatsache ist am leichtesten dadurch zu begreifen, daß neben den vielen Wegen, die im Laufe der Ausgestaltung des Gedankens die Brücke zwischen den beiden zu verknüpfenden Vorstellungen gebildet haben, ein direkter Weg zwischen den Ganglien, die die Träger dieser Vorstellungen sind, gebildet wird, der bald der gangbarste wird. In der neuen Generation wird die Bildung dieses direkten Weges durch den Unterricht sehr leicht bewerkstelligt und dadurch dieser der ganze Kampf der alten Generation erspart, in den Kern der neuen Wahrheit einzudringen; ja, die neue Generation begreift gar nicht die Schwierigkeiten, die die alte hat überwinden müssen. Sie ist von Anfang an von den falschen Verbindungen der Ganglien frei, die die alte Generation in ihren Gehirnen erst mit Mühe hat ungangbar machen müssen; und so kann sie, von diesem Ballast befreit, die Wissenschaft leicht fördern. So ist der Fortschritt der Erkenntnis unmittelbar mit der begrenzten Lebensdauer der Generationen verknüpft.

Danach scheint ein durchschnittlich kurzes Lebensalter ein besonderer Vorteil für die Kulturentwicklung zu sein, da die Jugend im Vergleich zum Alter überwiegt und sowohl leichter neue Gedanken schafft als auch neue

Gedanken anderer durch die Lehre leichter aufnimmt. Aber was der Jugend abgeht, die Erfahrung, hat das Alter vor ihr voraus; und diese bietet einen erheblichen Ausgleich, um die gleichmäßige konservative Entwicklung der Kultur zu erhalten. Immerhin darf die staunenerregende, rasche geistige Entwicklung der Griechen im Altertum wie auch die überraschende Erholung Deutschlands von dem entsetzlichen Unglück des 30jährigen Krieges zum Teil darauf zurückgeführt werden.

60 Die körperlichen Eigenschaften sind dem Menschen und den Tieren durch den Einfluß der Umgebung im weitesten Sinne im Laufe einer langen Entwicklung aufgeprägt worden; und da die Tiere wie die einzelnen Völker meist lange Zeiten unter denselben äußeren Bedingungen gelebt haben, sind die Veränderungen während dieser Zeit nur gering gewesen. Die Abweichungen, die offensichtlich vorkommen, sind entweder so bedeutend im einzelnen Falle, daß der Betreffende ihretwegen im Kampfe ums Dasein unterliegt, oder sie sind nur klein und gleichen sich dann im Laufe der Generationen wieder aus, so daß die verschiedenen Rassen der Art Mensch im wesentlichen nach der körperlichen Seite unverändert bleiben. Etwas anders liegen die Dinge bei der geistigen Entwicklung. Ihr Substrat ist das Gehirn. Auch dessen Änderungen werden durch die Außenwelt bedingt, indem der Mensch die Vorgänge in dieser Außenwelt verstehen will. Daher muß das Gehirn so gestaltet werden, daß eine Übereinstimmung der Vorgänge in der Natur und ihrer Erklärung durch den Menschen erzielt wird. Die Erklärung besteht in Gedanken; und die Gedanken entstehen durch den Ablauf eines Vorstellungsreizes zu einem anderen entweder auf direktem Wege oder über andere Ganglien hinweg. Da diese Ganglien im Gehirn dicht beieinander liegen, so ist die Verbindung nicht übermäßig schwer, wenn das beharrliche Denken dauernd Impulse zum Suchen derselben liefert; und darin unterscheidet sich unser Gehirn von anderen Organen unseres Körpers, auf die zwar auch äußere Impulse einwirken, gegen die das Organ aber im allgemeinen nur einwirkt, um sich zu erhalten, nicht, um sich zu ändern. Nicht jede Verbindung von Vorstellungsganglien ermöglicht einen Gedanken, der ein Verständnis der Außenwelt bringt. Solche falschen Verbindungen müssen vermieden oder, falls sie bestanden haben, wieder beseitigt werden. Damit auch ganz neue Vorstellungen dem Denken zur Verfügung gestellt werden können, sind neue Ganglien im Gehirn zu bilden, was durch Zweiteilung erfolgt. So ist das Gehirn die komplizierteste Maschine, die es gibt, und zwar eine solche, die das Denken immer weiter auszugestalten vermag. Sie ist in den Köpfen der verschiedenen Menschen verschieden, bei den niederen Rassen anders als bei den höheren, bei den Mitgliedern einer höheren Rasse sehr weit voneinander abweichend, bei den Mitgliedern einer niederen mehr untereinander übereinstimmend. Aber wie das Gehirn beschaffen ist, so muß der Mensch denken. Das Denken selbst vermag diese Denkmaschine etwas umzuformen; aber nach der Änderung muß der Mensch wieder so denken, wie das abgeänderte Gehirn vorschreibt, bis eine neue Änderung des Gehirns das Denken wieder anders bestimmt. Falsche Ansichten bleiben daher in einem ganzen Volke oder auch nur in einer Volksklasse lange erhalten, wenn die ganze Masse von diesem Gedanken beherrscht wird, wie etwa der des Sozialismus, daß nur der Altruismus kulturfördernd wirkt und der Egoismus immer kulturwidrig ist, oder die unserer Feinde, daß wir den Weltkrieg bewußt erstrebt hätten, und zwar um die Weltherrschaft zu gewinnen, während wir einer lange vorbereiteten Einkreisung unserer Feinde vergebens zu entrinnen suchten. Solche falschen Ansichten können nur durch Belehrung beseitigt werden, die jedoch langsam fortschreitet.

61 Nach diesen Darlegungen ist die von Locke und seinen Anhängern aufgestellte Ansicht, daß das Gehirn eines Neugeborenen eine unbeschriebene Tafel sei, die erst durch die Erfahrung Aufzeichnungen aufnehme, insoweit als falsch anzusehen, als das Gehirn ein Organismus ist, der nicht willkürlich Gedanken aufnehmen kann, sondern nur solche Gedanken, die sein Aufbau zuläßt. Die Reize, die die Außenwelt auf die Sinnesorgane ausgeübt hat, werden im Gehirn von solchen Ganglien aufgenommen, die mit den einzelnen Sinnesorganen durch Nervenfäden in unmittelbarer Verbindung stehen, so daß diese Reize nach ganz bestimmten Ganglienkomplexen hingeführt werden, die das Vorstellungsgebiet des Gehirns ausmachen. Von hier werden sie zu anderen Ganglien geleitet, so daß dieser letztere Reiz den Gedanken als die Verknüpfung zweier Vorstellungen momentan erzeugt und ihn immer wieder erzeugt, wenn ein neuer Reiz von dem einen Ganglion zu demselben anderen Ganglion verläuft. Man darf aber noch weiter gehen und annehmen, daß schon vor der Geburt des Kindes Reize von den Sinnesorganen nach dem Gehirn geleitet werden, z. B. Gefühlsreize, auch solche Reize, welche die „unwillkürlichen" Bewegungen des Kindes im mütterlichen Schoße veranlassen. Dann kann überhaupt von einer Tabula rasa des Neugeborenen im Sinne Lockes keine Rede mehr sein. Hunger- und Durstgefühle können einem Wesen in diesem Stadium kaum abgesprochen werden; und wenn das Kind zur Welt gekommen ist, dann setzen gleich zweckmäßige Bewegungen ein, die bis jetzt auf einen unbewußten Instinkt zurückgeführt werden, der aber nichts anderes ist als der Reiz, der z. B. vom leeren Magen ausgeht und über das Gehirn weg zu den Muskeln geführt wird, die das Schreien veranlassen, oder wenn das Kind an die Brust gelegt wird, über das Gehirn zu den Lippen gelangt, um die Saugbewegungen auszulösen. Der von den Eltern durch Vererbung auf das Kind übertragene Organismus, der ganze Komplex der Organe wird durch die äußeren oder inneren Reize, die auf das Kind einwirken, in Tätigkeit gesetzt, in eine sehr komplizierte Tätigkeit, die gar nicht verstanden werden kann, wenn nicht der Körper mitsamt dem Gehirn eine einzige große Maschine ist.

62 Nun wird diese Maschine durch Vererbung auf die Kinder übertragen und ist dadurch von den Gehirnen beider Eltern ebenso abhängig wie auch die übrigen Körperorgane gemischte Eigenschaften der Eltern aufweisen. Aber während die Abweichungen dieser letzteren bis zu den Sinnesorganen bei den Mitgliedern eines Volkes nicht wesentlich sind, so daß der Nachkomme den Eltern annähernd gleiche Organe erhält, kann der Unterschied in der Gehirnbildung sehr groß werden, wenn das Gehirn des einzelnen von seiner geistigen Leistungsfähigkeit abhängt in der Weise, daß beide sich gegenseitig bedingen. Stehen beide Eltern auf der gleichen Höhe der geistigen Ausbildung, so wird das Gehirn des Nachkommens von dem der beiden Eltern nur wenig abweichen, so daß dieser die Aussicht hat, die gleiche Höhe geistiger Tüchtigkeit zu erreichen. Ist dies aber nicht der Fall, so tritt ein Kampf der Vererbungstendenzen in dem Gehirn des Nachkommens ein, der seiner günstigen Entwicklung nachteilig ist. Am gefährdetsten sind die Kinder, die aus einer Ehe entspringen, zu der sich Mitglieder einer höheren und niederen Rasse vereinigt haben. Eine organische Entwicklung des Kindergehirns aus den Elterngehirnen ist hier schwer möglich, da der Unterschied der Anlagen zu groß ist. Auch zeigt die Erfahrung, daß die Nachkommen meist moralisch minderwertiger als beide Eltern sind und intellektuell mehr dem Elter der niederen Rasse nahestehen. Wenn eine niedere Rasse zu einer höheren Kultur emporgehoben werden soll, so darf sie sich nicht mit einer höheren mischen, sondern sie muß allmählich durch Lehre

besonders der Kinder auf die höhere Stufe gebracht werden; dazu sind nicht so viele Generationen erforderlich, als die höhere gebraucht hat, um selbst zu dieser Stufe zu gelangen, da die Jugend der niederen Rasse befähigt ist, eine größere Menge neuer Vorstellungen, die ihre Vorfahren nie gehabt haben, in sich aufzunehmen. Wenn diese Erziehung durch einige Generationen durchgeführt ist, darf mit einer Angleichung der Begabungen beider Rassen gerechnet werden. So haben sich in den Vereinigten Staaten die Neger so schnell entwickelt, daß viele von ihnen die Kultur der Weißen erreicht haben, wenn selbstverständlich auch noch nicht die ganze Masse diese Höhe erklommen hat. Aber diese gleiche geistige Höhe bei allen Volksgenossen, wie sie etwa auf Island im ausgehenden Mittelalter geherrscht hat, wird jetzt bei keinem Kulturvolk Europas erreicht, obwohl hier der Aufstieg und Abstieg der Geschlechter im Laufe der Zeit eine Angleichung der geistigen Spannkraft herbeigeführt hat. Diese Angleichung kann durch den Unterricht stark gefördert werden, wenn er auf das Wissenswerte beschränkt wird und wenn darauf gehalten wird, nur klare Vorstellungen auszugestalten. Was aber als Ballast aus den jetzigen Lehrplänen hinauszuwerfen ist und was als neu hinzugefügt werden muß, darüber wird so lange eine Verständigung nicht möglich sein, als Theologen, klassische Philologen und Juristen als die Begünstiger des „formalen Wissens" in diesen Dingen das Hauptwort sprechen.

Im Zusammenhang hiermit möchte ich zum Schluß auf das Wort Aristoteles' in seiner Ethik hinweisen: „Erziehen heißt: gewöhnen"; d. h. den Menschen so auf ein Verhalten im Leben einzuüben, daß er die eingeschlagene Lebensbahn nicht wieder verlassen kann, oder in der hier dargelegten Weise ausgedrückt, sein Gehirn so zu formen, daß es ihn nötigt, in der Art zu denken, wie das Zusammenleben in Völkern und Staaten fordert, damit diese bestehen bleiben und sich weiter entwickeln können. Die Gesetze, die dieses Zusammenleben ermöglichen, umfassen das Gebiet der Sittlichkeit; und bei genauem Prüfen hat die Sitte nie aus etwas anderem bestanden als aus diesen Gesetzen. Danach gibt es auch keine absolute Sittlichkeit, sondern nur eine relative, relativ zur Kulturhöhe der menschlichen Gesellschaft, wenn sich auch die Sitten der verschiedenen Völker im Laufe der Entwicklung mehr und mehr ausgleichen werden.

6. Abschnitt.

Die elektrische Energie ist kinetisch.

63 In dem 3. Abschnitt wurde der Nachweis geführt, daß die galvanische Energie ohne Zuhilfenahme der Elementarquanten (+ e) und (— e) verstanden werden konnte. Es drängt sich daher von selbst die Frage auf, welche von den übrigen Arten der elektrischen Energie in der gleichen Weise begriffen werden kann? Ehe aber darauf eingegangen wird, soll das Ohmsche Gesetz einer sorgfältigen Besprechung unterzogen werden, um die Unklarheiten aufzudecken, mit denen es behaftet ist, und die Wege kritisch zu beleuchten, auf denen man dem Verständnis näherzukommen suchte.

Das Ohmsche Gesetz bringt die drei Größen: elektrische Stromstärke, elektrische Spannung und elektrischen Widerstand in einen rechnerischen Zusammenhang und sagt aus, daß die Stromstärke A gleich der Spannung V, dividiert durch den Widerstand w ist, also $A = \frac{v}{w}$ oder $v = Aw$. Natürlich kann man dies Gesetz erst verstehen und auf seine Richtigkeit prüfen, wenn

man weiß, was Ohm unter den drei genannten Größen verstanden hat. Nun hat Ohm angenommen, daß der elektrische Widerstand eine Länge sei. Der elektrische Strom nimmt, wenn er durch einen Draht fließt, mit der Länge des durchflossenen Drahtes ab, und zwar genau proportional mit der Länge des Drahtes. Demnach kann man die Abnahme des Stromes durch eine Drahtlänge messen. Da aber die Abnahme nicht nur von der Länge des Drahtes, sondern auch von seinem Querschnitt und von dem Stoff, aus dem er besteht, abhängig ist, so mußte man einen Normaldraht aus bestimmtem Stoff und von bestimmtem Querschnitt wählen; und man nahm dazu eine Zeitlang einen Quecksilberfaden von 1 qmm Querschnitt und bezeichnete davon 1 Meter Länge als die Einheit des Widerstandes, indem man die Ursache der Stromabnahme Widerstand nannte. Jetzt konnte man alle Widerstände nach einem einheitlichen Maße messen. Ohm war nun der Meinung, daß diese Widerstandseinheit auch ihrem Wesen nach eine Länge war.

Dieser Schluß ist aber sehr voreilig. Zunächst ist eine Länge unabhängig von dem Stoffe, aus dem der Maßstab gemacht ist, wie auch von der Dicke. Dagegen ist der Widerstand von beiden abhängig. Ferner wird auch die Temperatur meist durch eine Länge gemessen. Alle Quecksilber- und Weingeist-Thermometer, im Prinzip aber auch alle Luft- und Fest-Thermometer messen die Temperatur durch eine gewisse Länge; aber es fällt niemandem ein, die Wärme selbst als eine Länge zu bezeichnen. Die Wärme ist eine Energie; und eine Energie kann eben auch durch eine Länge gemessen werden. Auch im täglichen Haushalt wird vermittelst der Federwage die Gravitationsenergie gleichfalls durch eine Länge gemessen, durch die Senkung der auf der Feder ruhenden Schale infolge des aufgelegten Gewichtes, weil Gewicht und Senkung proportional sind. Daher ist es nicht ohne weiteres zulässig, den elektrischen Widerstand als eine Länge anzusehen, weil er durch eine Länge gemessen wird. Ohm hätte besonders nachweisen müssen, daß Widerstand und Länge gleichbedeutend sind. Zu jener Zeit allerdings, als Ohm seine Abhandlung schrieb, 1827, war von dem Energieprinzip noch keine Rede; und demnach war der ihm zu machende Vorwurf nicht groß. Aber als dieses Gemeingut der Wissenschaft wurde, da mußte man sich klar werden, daß alle Änderungen in der Welt durch Arbeiten bewirkt werden, die das Maß der dabei aufgewendeten Energie sind, und daß, wo Längenänderungen an Meßinstrumenten beobachtet werden, diese Änderungen Umwandlungen freier Energie in gebundene messen. Während man daher Ohm nur den Vorwurf der Voreiligkeit machen darf, muß man der neueren Wissenschaft den Vorwurf machen, daß sie Falsches, was mit den Grundlagen unserer Erkenntnis in Widerspruch steht, erhalten und weiter gepflegt hat. Nach dieser muß der elektrische Widerstand eine Energie sein; und in der Tat ist es diejenige Energie, welche im Draht als elektrische vernichtet und in Wärme umgewandelt ist, also auf das Meßinstrument nicht mehr einwirken kann. Die in einem Draht als Schraubenenergie vernichtete, als Wärme auftretende Energie kann weder auf die Magnetnadel eines Amperemeters einwirken, da dies nur fließende Energie vermag, noch in einer Zersetzungszelle Ionen entionisieren, da sie gar nicht in die Zelle gelangt, und wenn sie durch Leitung dahin gelangen sollte, nicht mehr Schraubenenergie ist. Daß der Draht infolge des Widerstandes wärmer wird, also Energie aufgenommen hat, die nur aus der Energie des zugeführten Stromes bestritten werden konnte, muß von jedem Einsichtigen zugestanden werden.

Als die zweite der drei Größen des Ohmschen Gesetzes hat man die Stromstärke festzulegen gesucht. Diese richtig abzugrenzen, ist schwer, so lange man von dem Wesen der Elektrizität keine klare Vorstellung hat. Die

übliche Erklärung als die Menge Elektrizität, die in der Zeiteinheit durch den Draht fließt, sagt gar nichts aus. Nun bot aber das Faradaysche Gesetz der elektrolytischen Zersetzung einen Weg, verschiedene elektrische Ströme miteinander zu vergleichen. Man ließ diese nacheinander während gleicher Zeiten durch ein Voltameter oder durch eine Zelle, in der ein Silbersalz gelöst war, hindurchgehen und bestimmte die Mengen Knallgas oder reinen Silbers, das auf der Kathode niedergeschlagen wurde; und nachdem man eine bestimmte Menge Knallgas bzw. eine entsprechende Menge Silber, die in der Zeiteinheit freigemacht war, als Einheit festgesetzt hatte, konnte man die Strommengen in Maßzahlen dieser Einheit angeben. Da die Strommengen durch die niedergeschlagenen Massen gemessen werden, sollte es nahegelegen haben, diese Mengen als Massen zu definieren. Aber man hat darauf verzichtet und der Strommenge eine ganz andere Dimension zugesprochen. Es braucht aber hier nicht weiter betont zu werden, daß die abgeschiedene Silbermenge wieder einer Arbeit entsprang, die durch eine Energie geleistet wurde, so daß die Stromstärke selbst gleichfalls eine Energie ist.

Wenn nun aber Stromstärke wie Widerstand Energien sind, dann muß auf Grund des Ohmschen Gesetzes $V = Aw$ die Spannung V gleich dem Quadrat einer Energie sein. Das ist natürlich widersinnig; und somit kann das Ohmsche Gesetz nicht richtig sein. Daran ändert auch nichts der Umstand, daß man auf Grund des Ohmschen Gesetzes Apparate gebaut und mit ihrer Hilfe Stromstärken und Spannungen gemessen hat, die dieselben Größen hatten, wie eine andere Berechnung sie verlangte. Wie dies möglich gewesen ist, darauf soll nachher eingegangen werden.

64 Um das Ohmsche Gesetz, dessen Verständnis erfahrungsgemäß jedem Lernenden Schwierigkeiten bereitet, leichter zugängig zu machen, hat man das Fließen der Elektrizität durch einen massiven Draht in Vergleich gebracht mit dem Abfließen von Wasser aus einem Gefäß, in dessen Seitenwand am Boden eine horizontale Röhre eingesetzt ist. Läßt man das Wasser des Gefäßes durch die Röhre abfließen, so ist der Druck in dieser nicht überall gleich, sondern nimmt vom Beginn bis zum Ende der Röhre proportional der durchlaufenen Strecke ab. Man kann diese Abnahme sichtbar machen, indem man in die horizontale Röhre in gleichen Abständen vertikale Röhren von oben einsetzt. Dann steigt in ihnen Wasser empor, dessen Höhe in den aufeinanderfolgenden Röhren nach dem Ende gleichmäßig abnimmt. Diese kleinen Wassersäulen entsprechen dem Drucke, der an den einzelnen Stellen der Horizontalröhre ausgeübt wird. Mit diesem Druck wird die Spannung verglichen, während das fließende Wasser die Stromstärke versinnbildlichen soll.

Nun hat das fließende Wasser eine Masse und eine Geschwindigkeit, also eine lebendige Kraft oder Energie; und diese freie Energie wird aus der Gravitationsenergie des im Gefäße befindlichen Wassers bestritten. Diese Gravitationsenergie war bereits in dem Wasser, als es noch nicht in Bewegung war, war aber, so lange als die Röhre geschlossen war, auf die Gefäßwände übertragen und dort infolge des Energiemangels des festen Glases gebunden. Die Richtigkeit dieser Vorstellung ergibt sich daraus, daß die Bindung dieser Energie nicht weiter geht als, bis der, den festen Zustand bedingende Energiemangel durch die Aufnahme von Gravitationsenergie überwunden ist und damit das Zerreißen der Gefäßwand ermöglicht wird. Bei der Öffnung geben die Wände genau so viel Energie ab, als sich mit dem fließenden Wasser fortbewegen kann. Denn so wie und so viel freie Energie sich bilden kann, entsteht nach dem einzigen Grunde des Weltgeschehens. Diese freie Energie nimmt infolge der Reibung an der Röhrenwand bis zum

Ende allmählich ab, wo dann das Wasser mit verminderter Geschwindigkeit abfließt. Die in der Horizontalröhre abnehmende Energie leistet überall dort sichtbare Arbeit, wo sie solche leisten kann, und zwar nach dem Ausmaß ihrer Größe und hebt deshalb das Wasser in den Vertikalsröhren so hoch, als es ihre Arbeitsfähigkeit vermag. Sinkt die Wasseroberfläche im Gefäße und damit die freie Energie des abfließenden Wassers, so nimmt auch am Boden aller vertikalen Röhren die arbeitleistende Energie ab und damit die Wassersäule in den vertikalen Röhren. Es kommen also bei dem ganzen Vorgange die Energien in Frage und nicht etwa die Drucke, soweit diese als dem Produkt aus Masse und Beschleunigung proportional gesetzt werden und als solche wie jede andere Kraft nur Abstraktionen sind. Nun kann diese Druckenergie des fließenden Wassers nicht mit Spannung und Volt gleichgesetzt werden; oder die Spannung ist auch eine Energie. Der Vergleich zwischen dem fließenden Wasser und der fließenden Elektrizität führt also zu dem Schluß, daß die Spannung als Energie aufgefaßt werden muß, ganz entgegen der bisherigen Auffassung. Dann bleibt für die Stromstärke aber nichts anderes übrig, als daß sie als unbenannte Zahl, als Maßzahl angesehen wird, die sich bei Messung einer Energie nach einer Energieeinheit ergibt. In diesem Falle erhält wenigstens die Ohmsche Formel, in der w und U Energien sind, einen verständlichen Sinn: $A = \frac{v}{w}$. Damit ist aber noch nicht gesagt, daß diese Formel dann auch richtig ist; es wird sich jedoch nachher zeigen, daß sie nach einer weiteren Änderung wirklich richtig wird, dann aber einen längst bekannten Satz ausdrückt.

65 Ich komme nun auf die bisherige Methode, die Stromstärke und die Spannung schnell zu messen und zwar durch die Ablenkung der Magnetnadel infolge des elektrischen Stroms. Und da stellt sich die merkwürdige Tatsache heraus, daß beide, die nach der bisherigen Auffassung etwas ganz Verschiedenes und vor allem voneinander ganz Unabhängiges sein sollen, doch mit Hilfe desselben Instrumentes und mit Hilfe desselben Vorganges in ihm gemessen werden. Der Einwand, daß man zwei Instrumente, das eine als Amperemeter für die Stromstärke und das andere als Voltmeter für die Spannung verwendet, ist hinfällig. Denn beide Apparate beruhen auf demselben Prinzip; und beide sind so übereinstimmend gebaut, daß man den ersten durch Einschalten eines meist $^9/_{10}$ der ursprünglichen elektrischen Energie vernichtenden Widerstandes in den anderen verwandelt. Nun wird nach der Theorie vor Einschalten des Widerstandes eine Stromstärke, nach Einschaltung eine Spannung gemessen. Vor dieser Einschaltung ist jedoch die Strombahn durchaus nicht widerstandslos; denn die Zuführungsdrähte von der Elektrizitätsquelle bis zum Apparate und in die Leitungen des Apparates bieten der Messung der Stromstärke einen nicht verschwindenden Widerstand; danach muß doch der Apparat die Eigenschaft haben, bei einem bestimmten kleinen Widerstand eine Stromstärke, bei einem größeren dagegen ganz etwas anderes, eine Spannung, zu messen. Wie findet man da den Grenzpunkt, wo die Messung aufhört, eine Stromstärke zu liefern, und beginnt, eine Spannung anzuzeigen? Da die im Voltmeter wirkende elektrische Energie meist den zehnten Teil der im Ampèremeter wirkenden ausmacht, so muß man schließen, daß, wenn eine bestimmte Energie in einem Amperemeter die Stromstärke bestimmt, ihr zehnter Teil die Spannung durch Nadelausschlag angibt. Nun kann man aber mit demselben Ampèremeter Energien auf ihre Stromstärke messen, von denen die größte mehr als hundertmal so groß ist wie die kleinste; dann muß doch ein Ampèremeter die Stromstärke einer Energie und die Spannung einer zehnmal so großen Energie genau mit derselben

Größe angeben. Wie weiß man dann, ob die Messung in dem besonderen Falle Spannung oder Stromstärke bedeutet? Ja, muß man dann nicht zu der Einsicht kommen, daß beide wesensgleich sind und sich nur durch einen Zahlenfaktor unterscheiden und daß beide die Dimension der Energie haben? Dann bestimmt man im Voltmeter die Energie des geschwächten Stromes und mit dem Amperemeter die des ursprünglichen und damit den Zahlenfaktor, mit dem die Teilenergie multipliziert werden muß, um die ganze Energie zu ergeben. Aber dieser Zahlenfaktor ist von dem Verhältnis der im Volt- und Amperemeter eingeschalteten Widerstände abhängig, so daß die Messungen zwei in einem Abhängigkeitsverhältnis stehenden Umformungen derselben Energie betreffen, während nach der theoretischen Auffassung Stromstärke und Spannung voneinander unabhängig sein sollen. Nach diesen Darlegungen muß die Messung der Energie im Ampèremeter allein schon genügen, um sie wenigstens angenähert zu ermitteln.

Hier bin ich auf einen Einwand gefaßt, daß man nachgewiesenermaßen mit demselben Apparate zwei voneinander ganz verschiedene Größen vergleichen und also auch messen könne, nämlich mit dem Pendel oder der Federwage. An demselben Orte gebraucht, kann man mit ihr verschiedene Massen miteinander vergleichen, an verschiedenen Orten gebraucht, mit derselben Masse zwei Beschleunigungen, wobei Masse und Beschleunigung voneinander unabhängige Größen sind. Daher sei es auch möglich, daß man mit dem Nadelapparat gleichfalls die voneinander unabhängigen Größen Stromstärke und Spannung messen könne; und dies sei um so eher zu erwarten, als Spannung und Stromstärke ebenso durch multiplikative Verknüpfung verbunden werden, um die Energie zu liefern, als Masse und Beschleunigung verbunden werden, um die Druckkraft der Gravitation zu gewinnen.

Nun wird durch die Federwage die Gravitationsenergie gemessen, die beim Auflegen des Gewichtes auf die Feder übergegangen ist und deren Energiemangel um die zugeführte Energie vermindert ist. Diese Verminderung wird an der Zusammenpressung der Feder und an der ihr proportionalen Senkung der Wagschale gemessen; und einer ganz bestimmten Senkung entspricht die Energieeinheit, das Kilogrammeter, und demnach bei konstanter Gravitationsenergie, also an derselben Stelle der Erde, auch die Masse eines Kilogramms. Demnach können an einem Orte die Massen verschiedener Gewichte durch die Federwage verglichen werden. Wird aber dasselbe Gewicht auf dieselbe Federwage an verschiedenen Orten der Erde aufgelegt, so sind die Senkungen der Wagschale verschieden groß; und wir schließen daraus, daß die von der Feder aufgenommenen Energien verschieden sind. Die Ursache dieser Veränderlichkeit ist auf den veränderten Abstand des gewogenen Gewichts vom Massenmittelpunkte der Erde zurückzuführen. Da aber die Gravitation erst im folgenden Kapitel behandelt und der notwendige Zuwachs derselben bei Annäherung an den, scheinbar anziehenden Körper erst dort begründet wird, so muß ich mich hier mit der tatsächlichen Feststellung und mit dem Hinweis begnügen, daß die Beschleunigung vom physikalischen Standpunkt aus der Energiezuwachs der Masseneinheit in verschwindend kleiner Zeit, aber auf die Zeiteinheit berechnet, ist, während die Beschleunigung vom kinematischen Standpunkt aus unter denselben Verhältnissen der Geschwindigkeitszuwachs ist. Die Summation sämtlicher Beschleunigungszuwüchse der Masseneinheit ergibt die Energie der Masseneinheit, und dieselbe Summation, über alle Masseneinheiten erstreckt, die Gesamtenergie. Die erstere Summe ist eine Funktion der physikalischen Beschleunigung und ist mit $^1/_2\, v^2$ Energieeinheiten er-

mittelt. Demgemäß enthält die Energieformel nur die Bestimmungsstücke m und v, die voneinander unabhängig sind.

Die Bestimmung zweier Massen bei gleicher Beschleunigung bedingt zwei Versuche, die Bestimmung zweier Beschleunigungen bei gleicher Masse ebenfalls zwei, also im ganzen vier. Man kann mit drei Versuchen auskommen, wenn der eine die gemeinsame Beschleunigung der ersten Gruppe und die gemeinsame Masse der zweiten Gruppe enthält. Dagegen kann man nicht mit zwei Versuchen allein auskommen, um beide Aufgaben zu lösen.

Auch mit dem Nadelapparat wird das Verhältnis zweier Energien gemessen, von denen wir wissen, daß die eine infolge des eingeschalteten Widerstandes kleiner als die andere ist und zwar in Abhängigkeit von der Größe dieses Widerstandes; aber damit hört die Ähnlichkeit zwischen den Versuchen an ihm und an der Federwage auf. Sie würde nur bestehen bleiben, wenn durch zwei Versuche mit gleichbleibender Stromstärke die Spannungen und durch zwei entsprechende Versuche mit gleicher Spannung die Stromstärken verglichen würden. Man müßte dazu zunächst die Mittel haben, derartige Ströme herzustellen; dann würden aber, um die gesuchten Größen aufzufinden, nicht zwei, sondern vier oder wenigstens drei Versuche notwendig sein, wenn für den letzteren Fall e i n Versuch so beschaffen ist, daß er zu beiden Vergleichungen benutzt werden kann. Nach der bisherigen Anschauung sollen aber zwei Versuche genügen, um die beiden Unbekannten Stromstärke und Spannung zu liefern; und zwar soll der eine Versuch die Stromstärke und der andere die Spannung liefern. Nun sind nach der geltenden Vorstellung Spannung und Stromstärke Größen, die an sich von einander unabhängig sind; aber die gemessenen Größen stehen in Abhängigkeit voneinander durch die Größe des beim zweiten Versuch eingeschalteten Widerstandes. Demnach kann man die Größen Spannung und Stromstärke, die der herrschenden Vorstellung genügen, durch die beiden Messungen gar nicht erhalten.

66 Die Wissenschaft hat gefühlt, daß die Begriffe Stromstärke und Spannung trotz des Vergleiches mit fließendem Wasser noch recht in der Luft schweben. Wenn man auch die Spannung mit der Druckkraft des fließenden Wassers gleichsetzte, so fehlte doch für die Stromstärke das richtige Äquivalent; denn dieses konnte nicht die Masse des Wassers sein, da diese schon in der Spannung enthalten war. Um eine befriedigende Vorstellung zu gewinnen, suchten die Physiker, die Dimensionen beider Größen festzulegen und benutzten dazu den von Joule mit einem nach dem Ohmschen Gesetz geeichten Meßapparat empirisch gefundenen Satz, daß die bei der Vernichtung des elektrischen Stromes in den Drähten gebildete Wärme dem Widerstand und dem Quadrat der Stromstärke direkt proportional war und demnach die Dimension A^2w haben mußte. Die Wärme hat jedoch die Dimension mv^2, oder da $v = \frac{s}{t}$ ist, die Dimension ml^2t^{-2}. Da w nach Ohm eine Länge ist, so fällt in der Gleichung $A^2w = ml^2t^{-2}$, das w links gegen ein l rechts fort; und man erhält: $A^2 = mlt^{-2}$, also $A = m^{1/2}l^{1/2}t^{-1}$, und da nach Ohm $V = Aw$ ist, ist $V = m^{1/2}l^{3/2}t^{-1}$.

Diese Dimensionsformeln haben schon über 50 Jahre in der Wissenschaft unbeanstandet ihr Dasein geführt. Den Zweck, die Vorstellungen Stromstärke und Spannung schärfer herauszuarbeiten, haben sie nicht erfüllt; denn was beide Dimensionsformeln aussagen, ist einfach unvorstellbar. Unter der Quadratwurzel einer Masse und einer Strecke kann man sich nichts vorstellen; und deshalb sind beide Formeln nicht nur wertlos, weil außerhalb jeder Erfassung der Wirklichkeit, sondern aus diesem Grunde auch

falsch; und Spannung und Stromstärke, die diesen Dimensionen entsprechen sollen, sind einfache Hirngespinste. Sie sind auch keine Abstraktionen, wie etwa die Kraft in der bisherigen Bedeutung, die auch nicht wirklich ist, sondern entweder als ein Faktor der realen Energie gedacht wird oder als die Synthese von Masse und Beschleunigung, welche beiden Begriffe sich auf die Anschauung stützen. Aber die Dimensionen von Stromstärke und Spannung spotten jeder Vorstellung und sie verrammeln jede Möglichkeit für das Verständnis des Wesens der Elektrizität. Die Überlegungen, die zu diesen Formeln geführt haben, weisen auf eine hohe Fähigkeit hin, abstrakt zu denken; aber das Denken ist so abstrakt, daß es von jeder Übereinstimmung mit der Wirklichkeit absieht und daß es daher den einzigen Schluß, den es ziehen sollte, übersieht, daß nämlich die Begriffe Stromstärke und Spannung, wie sie die Wissenschaft ausgestaltet hat, falsch sein müssen.

Mit demselben Rechte hätte man auf dem bisherigen Standpunkt der Wissenschaft auch zum folgenden Schlusse kommen können. Die Stromstärke wird auf zwei Wegen gemessen, einmal im Zersetzungsapparat durch die Menge des auf der Kathode niedergeschlagenen Silbers, also durch eine reine Masse m und einmal im Amperemeter durch Nadelausschlag; und in diesem Falle wird ihr die Dimension $m^{1/2}l^{1/2}t^{-1}$ zugeschrieben. Dann muß $m = m^{1/2}l^{1/2}t^{-1}$ oder nach Quadratur: $m^2 = mlt^{-2}$ oder $m = lt^{-2}$. Da lt^{-2} die Dimension einer Beschleunigung ist, so ist jede Masse eine Beschleunigung. Mich wundert, daß noch niemand vorher diese Schlußfolgerung gezogen und daraufhin die Richtigkeit der Dimensionsformeln von A und v angezweifelt hat.

67 Wenn nun auch das Ohmsche Gesetz, wie ich überzeugend nachgewiesen zu haben glaube, falsch ist, so ist doch Ohm ein viel zu bedeutender Forscher gewesen, als daß nicht in seinem Irrtum ein gut Teil Wahrheit vermutet werden darf; und dies ist um so eher zu erwarten, als sich sein Gesetz so lange ohne Einspruch gehalten hat; und es fragt sich, wie das Gesetz, das Ohm vorschwebte, richtig zu formulieren ist. In der Formel $A \cdot w = V$ ist w als eine Energie anzusehen; dann muß V auch eine solche sein; und für A bleibt nur ein Zahlenfaktor übrig, wie schon hervorgehoben worden ist. Je größer die durch den Widerstand vernichtete elektrische Energie ist, um so kleiner wird dieses E sein. Wird die ganze elektrische Energie vernichtet, so ist $w = E$. Dann lautet die Ohmsche Formel $A \cdot E = V$. Nun soll A der Zahlenfaktor sein, mit dem V multipliziert werden muß, um E zu ergeben; dann muß aber $E = A \cdot V$ sein; d. h. aber in der Ohmschen Formel steht A auf der verkehrten Seite. An Stelle von $A = \frac{V}{w}$ hätte Ohm setzen müssen: $A = \frac{w}{V}$. Diese Gleichung würde aber, wenn für w E eingesetzt wird, zu der Formel $E = A \cdot V$ geführt haben. Diese ist aber die zweite Form der Jouleschen Wärmeformel, die soviel zu der allgemeinen Annahme des Gesetzes von der Erhaltung der Energie beigetragen hat. Man darf daher der Vermutung Raum geben, daß Ohm ohne die irrtümliche Auffassung des Widerstandes als Länge aus seinen theoretischen Überlegungen schon 20 Jahre früher das gefunden hätte, was Joule aus seinen Versuchen abgeleitet hat, und daß man ihn dann zu einem bedeutenden Vorläufer des genannten Gesetzes zu zählen hätte. So hat aber sein Gesetz Anlaß gegeben, die unklaren Größen Stromstärke und Spannung in der Wissenschaft aufrecht zu erhalten, als sie längst durch die Größe Energie hätten ersetzt werden müssen, und hat dadurch den Weg zur richtigen Erkenntnis verlegt. Es ist

dabei bemerkenswert, daß die klar und nüchtern denkenden Engländer sich am längsten gegen das Gesetz gewehrt haben, es dann aber bereitwillig angenommen und damit ein sacrificio del intelletto gebracht haben, als die auf dasselbe gestützten Meßinstrumente die elektrische Energie mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln vermochten. So kam es, daß sie sich zu ihm bekannten, als die Wissenschaft grade Grund genug hatte, sich dagegen aufzulehnen.

68 Es bleibt noch übrig, den Punkt aufzuklären, ob und gegebenenfalls weshalb die Multiplikation der im Nadelapparat gefundenen, als Ampere und Volt bezeichneten Zahlen die Anzahl der Energieeinheiten genauer ergibt, als die Messung im Ampèremeter allein ermöglicht. Zu diesem Zwecke wollen wir uns erinnern, daß die Energie des elektrischen Stromes Schraubenenergie ist. Diese zerfällt in die Energie der fortschreitenden Bewegung Et und die der drehenden Bewegung Er, die senkrecht zur Bewegungsrichtung steht. Dann ist $E = Et + Er$. Wird diese Energie in ein Ampèremeter geleitet, in dem ein großer Widerstand eingeschaltet ist, so wird sie in zwei Teile zerlegt, in diejenige, welche durch den Widerstand in Wärme umgewandelt wird, Ew, und diejenige, welche noch auf die Galvanometernadel wirkt und Ev heißen soll. Dann ist auch $E = Ew + Ev$. Von beiden hat Ew gar keinen Einfluß auf die Nadel. Es kommt nur Ev in Frage. Diese enthält sowohl Längswucht wie Drehwucht; und beide wirken auf die Magnetnadel ein. Aber in welchem Verhältnis sie in der wirkenden Energie enthalten sind, steht nicht fest. Daß darüber überhaupt schon Experimentaluntersuchungen angestellt sind, dürfte sehr fraglich sein. Ferner ist die Frage zu erledigen, ob die Einheit der Längswucht auf die Nadel dieselbe Wirkung ausübt wie die Einheit der Drehwucht oder ob wenigstens die, von der freien Energie Ev auf die Nadel überfließenden Mengen Längswucht und Drehwucht immer dasselbe konstante Verhältnis haben. Solange dies nicht festgestellt ist, fehlt jede Grundlage zur sicheren Beurteilung, ob die Ablenkung der Magnetnadel zum Maß der gesamten aufgewandten Energie gemacht werden kann. Es könnte sein, daß eine Energie, deren Drehwucht neunmal so groß ist wie die Längswucht, die Magnetnadel stärker ablenkt als eine gleich große, deren Längswucht neunmal so groß wie die Drehwucht ist. Dann würden der gleichen Gesamtenergie doch verschiedene Nadelablenkungen entsprechen. Bei den bisherigen Messungen ist natürlich auf das Verhältnis der beiden Wuchten noch nie Rücksicht genommen; und daher ist der Rückschluß aus der Nadelablenkung auf die Größe der Energie noch unsicher.

Man wird darauf hinweisen, daß ja zwei verschiedene Wege zur Bestimmung der Energie oder nach den bisherigen Vorstellungen der Stromstärke zur Verfügung stehen und daß beide übereinstimmende Ergebnisse liefern. Aber diese Tatsache beweist nichts; denn der Nadelapparat ist nach dem Zersetzungsapparat geeicht, und daß innerhalb des Eichungsgebietes Übereinstimmung herrscht, ist selbstverständlich. Wenn die Messungen in dem letzteren mit der Berechnung aus den Zahlen des ersteren bis auf ein Hunderttausendstel übereinstimmen, so ist dies nur ein Zeichen für die Leistungsfähigkeit unserer Technik, solch brauchbare Apparate zu bauen. Aber außerhalb der Grenzen dieses Gebietes besteht die Übereinstimmung nicht mehr; daher hat man für verschieden große Energien auch verschiedene Apparate gebaut, die nur für bestimmte Intervalle zu Messungen brauchbar sind. Also besteht eine allgemeine Übereinstimmung in den Ergebnissen beider Meßmethoden nicht.

Neben der Eichung kann noch ein anderer Grund für die Übereinstim-

mung innerhalb gewisser Grenzen angeführt werden. Die im Zersetzungsapparat gemessenen Energien werden meist von galvanischen Strömen entnommen; und das sind solche, die eine große Drehwucht im Verhältnis zur Längswucht haben, wie ihr Ursprung aus der Großmolekelbildung begreiflich macht. Wenn sich nun herausstellen sollte, daß auf den Nadelapparat gleichfalls die Drehwucht stärker einwirkt als die Längswucht, so werden viele Energien, obgleich sie in ihrer Gesamtgröße recht verschieden sein können, doch in demselben Apparate Wirkungen ausüben, die sie gleich erscheinen lassen, wenn nämlich ihre Drehwuchten gleich sind. Ihre Energien werden aber auch in Wirklichkeit einander annähernd gleich sein, wenn beide Ströme galvanische sind, also eine verhältnismäßig kleine Längswucht im Vergleich zur Drehwucht haben. Dann werden die aus Messungen in beiden Apparaten gewonnenen Zahlen gleich sein, aber auch die Energien.

Aber in allen anderen Fällen darf man aus der Gleichheit der Nadelausschläge keinen sicheren Schluß auf die Gleichheit der Energien ziehen; und das allgemeine Zutrauen zu unseren Meßinstrumenten muß als erschüttert angesehen werden. Doch kann man sich einen Fall denken, in dem das Zutrauen zur Messung wieder gehoben werden kann, wenn es nämlich gelingt, die Drehwucht allein zur Geltung kommen zu lassen und nur sie zu messen. Nun wird die Längswucht der elektrischen Energie durch den Widerstand viel stärker beeinflußt als die mehr konservative Drehwucht. Nimmt daher der eingeschaltete Widerstand weiter zu, so kann der Zeitpunkt eintreten, daß die ganze oder fast die ganze Längswucht in Wärme umgewandelt ist, während der größte Teil der Drehwucht noch erhalten bleibt. Wird der Widerstand noch größer, so wird auch ein beträchtlicher Teil der Drehwucht in Wärme umgesetzt. Nun ist es die Aufgabe der Technik, die Apparate und den in ihnen eingeschalteten Widerstand so zu bauen, daß die Längswucht möglichst vernichtet und die Drehwucht möglichst erhalten wird. Ich nehme nun an, daß das Voltmeter ein solcher Apparat ist, der, wenn auch nicht vollkommen, doch angenähert die genannten Bedingungen erfüllt. Dann wird die Drehwucht im Voltmeter bestimmt. Diese wird dann in einem guten Apparat, der die Drehwucht noch ganz enthält, daher auch noch einen Rest von Längswucht durchläßt, immer zu groß gemessen. Ich nehme ferner an, daß das Amperemeter die Aufgabe erfüllt, die Zahl n zu bestimmen, mit der die Drehwucht multipliziert werden muß, um die Gesamtwucht zu ergeben. Diese Zahl n wird immer etwas zu klein ausfallen, da ein Teil der Gesamtwucht durch den Widerstand im Apparat und den Drähten vernichtet wird. Dann wird aber das Produkt der beiden ermittelten Zahlen die Zahl der Energieeinheiten angenähert richtig angeben. Wird z. B. n im Amperemeter um den p ten Teil zu klein, im Voltmeter die Drehwucht V um den q ten Teil zu groß angegeben, so unterscheidet sich der wahre Wert $E = nV$ von dem berechneten $E = nV\left(1 + \frac{1}{q}\right)\left(1 - \frac{1}{p}\right) = nV\left(1 - \frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \frac{1}{pq}\right)$ unter Vernachlässigung von $\frac{1}{pq}$ nur um $V\left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p}\right)$, wo die eingeklammerte Differenz nur einen kleinen Wert bei einigermaßen großem p und q ausmacht. Natürlich gilt dieser Schluß nur, wenn die beiden gemachten Voraussetzungen der Wirklichkeit entsprechen. Eine wirkliche genaue Messung der Gesamtwucht kann nur auf kalorimetrischem Wege erzielt werden; aber diese erfordert mehr Zeit, als die Technik für ihre Messungen übrig hat. Sie darf aber nicht unterlassen werden, um jeden Apparat zu eichen. Dann sind die Messungen in der üblichen Art mit Hilfe von Ampere und Volt als Näherungswerte nicht zu beanstanden.

Nun hat das Ohmsche Gesetz mit meinen Darlegungen der vorhergehenden Abschnitte nichts zu tun; meine Auffassung des galvanischen Stromes ist völlig unabhängig von den Begriffen Stromstärke und Spannung; aber es war doch zweckmäßig, es hier zu behandeln, einmal wegen der großen Rolle, die es in der Wissenschaft gespielt hat und noch spielt, und anderseits wegen der Möglichkeit, daß zur Widerlegung meiner Anschauungen ein Kritiker sich auf das Ohmsche Gesetz berufen möchte. Um der letzteren Möglichkeit einen Riegel vorzuschieben, war die Kritik geboten.

69 Wir wollen uns jetzt der am Eingang dieses Kapitels aufgeworfenen Frage zuwenden, welche anderen Erscheinungen auf dem Gebiete der Elektrizität sich ohne Elementarquanten allein durch Bewegungsvorgänge erklären lassen. Es liegt nun nahe, den Polarisationsstrom bzw. den Strom aus einem Akkumulator in gleicher Weise aufzufassen. Elektrolysiert man zwischen Platinelektroden Schwefelsäure, so lagern sich an der Kathode H-Atome als die gewesenen Kerne von Großmolekeln, an der Anode SO_4 ohne H_2O-Molekeln an, welches mit H_2O unter Abspaltung von O sich zu H_2SO_4 zurückbildet und darauf wieder in Ionen zerfällt. Die H-Atome haben beim Abschleudern der beiden H_2O-Molekeln ihre Energie in Form von Längswucht und Drehwucht behalten; aber sie sind trotzdem nicht vollständig frei beweglich; denn während die zwischen ihnen und der Kathode etwa liegenden H_2O-Molekeln des Lösungsmittels Wasser in einer der Kathodenfläche parallel liegenden Ebene fortgeschleudert werden, rotiert in dieser selben Ebene das H-Atom und wird durch die freien H_2O-Molekeln der Lösung gegen die Kathode gedrängt. In dieser dichten Anlagerung an die Kathode bleibt das H-Atom so lange, bis ein Zuwachs an Energie es wieder freimacht. Indem seine Drehwucht es an die Kathode bannt, sucht seine Längswucht es gegen diese und als Reaktion von dieser wegzudrücken, während die durch die Lösung getragene Energie der Elektrizitätsquelle das Atom wieder zurücktreibt. Neue isolierte H-Atome lagern sich auf der Kathode an, bis die ganze Fläche dicht mit ihnen besetzt ist. In dieser Fläche stoßen sie sich gegenseitig ab infolge ihrer Drehbewegung, da alle sich in demselben Sinne drehen und demnach die zugewandten Teile zweier benachbarten Atome entgegengesetzte Bewegungen haben, und werden dadurch nach dem Rande der Kathode und bei starker Anlagerung über sie hinausgetrieben. Die letzteren lösen sich von der Kathode ab, vereinigen sich miteinander zu H_2-Molekeln, werden dadurch frei und geben die aus der Zusammenlagerung entstehende freie Energie als Wärme an die Lösung ab. An den Kanten sieht man die H_2O-Molekeln, zu Gasbläschen vereinigt, emporsteigen. Bei starkem Strome lagern sich auch auf der Kathode mehrere H-Atome übereinander ab. Je zwei vereinigen sich zu H_2 und lösen sich von der Platte ab, aber wieder auf Grund der bei der Vereinigung frei werdenden Energie. Hieraus ergibt sich, daß die Anlagerung der H-Atome nur soweit möglich ist, als die Elektrodenplatte dazu Raum bietet, daß daher die Vergrößerung der Oberfläche, womöglich unter Beseitigung aller Ecken und Kanten, besonders geeignet ist, diesen Zustand der Polarisation zu erzielen und zu erhalten, der die Grundbedingung eines guten Akkumulators ist, daß aber jede weiter Stromzuführung nutzlos ist. Das durch sekundäre Wirkung an der Anode frei gewordene O ist an diese nicht gebunden und verbindet sich mit einem entsprechenden O zu O_2. Folglich kann die Anode nicht polarisiert werden.

Hört die Zuleitung des Stromes von der Anode des galvanischen Elementes auf, so werden die H-Atome auf der Kathode der elektrolytischen Zelle nicht mehr so stark an diese gedrückt; sie suchen sich daher infolge

ihrer Längswucht weiter von der Platte zu entfernen. Dann schieben sich zwischen ihnen und der Platte H_2O-Molekeln des Lösungsmittels ein und bilden mit ihnen Großmolekeln. Die hierbei freiwerdende Energie treibt sie in die Lösung hinein und drückt dadurch die übrigen H-Atome der Platte, die sich noch nicht gelöst haben, nach dieser zurück, so daß der Prozeß eine längere Zeit erfordert, bis die freie Energie aus der elektrolytischen Zelle abgeflossen ist. Daraus ergibt sich, daß, wenn auch bei guter Isolierung nur langsam, aus der Zelle die aufgespeicherte Energie der H-Atome, die gerade in ihrem Nichtverbundensein mit H_2O oder anderem H besteht, allmählich verschwindet. Werden jedoch die Zuleitungsdrähte der elektrischen Zelle direkt oder durch die leitende Zwischenschicht verbunden, so fließt die freie Energie der Zelle durch Draht und Zwischenschicht und ermöglicht dadurch immer von neuem die Bildung von H-Ionen, bis alle H-Atome auf der Kathode der Zelle in H-Ionen umgewandelt sind und in der Zwischenschicht ihre Energie abgegeben haben. Dann ist die im Akkumulator aufgespeicherte Energie nach der Arbeitsstätte verlagert worden. Wenn dafür gesorgt ist, daß sich keine H-Atome auf der Kathode der elektrolytischen Zelle anlagern können, vermag sich auch kein Gegenstrom zu bilden. Daraus erklären sich die verschiedenen Mittel, die Polarisation zu beseitigen. Der Umstand, daß H im Atomzustand auf der Kathode ruht, erklärt außerdem, weshalb die Vereinigung des H mit dem zur Verfügung gestellten O, z. B. in MnO_2, ohne weiteres vor sich gehen muß, weil nämlich bei der Bildung von H_2O Energie frei wird. Es ist aber keine elektrische Energie, sondern Wärme, weil keine Großmolekeln H, sondern unmittelbar H_2O gebildet wird.

70 An die Frage des Transportes der Schraubenwucht in einer Lösung schließt sich die nach dem Transport auf einem Leiter an. Die Art dieses Transportes wird verschieden ausfallen, je nachdem die Atome des festen Leiters elastisch oder nicht elastisch sind. Denn da dieser Transport durch Stöße vermittelt wird, kommen die Vorgänge beim Stoß elastischer und nichtelastischer Körper in Frage. Beim Stoß unelastischer Körper geht ein Teil der Energie in Schwingungswucht, also in Wärme über. Der übrigbleibende Teil gibt beim nächsten Stoß wieder Energie ab, bis nach einer Reihe von Stößen die ganze Bewegungswucht in Schwingungswucht umgeformt ist. Beim Stoß elastischer Körper wird von der ganzen Energie nichts in Schwingungswucht umgesetzt; diese sind daher das Mittel, durch welches Energie vollkommen übertragen wird, also die Unterlage für den Transport elektrischer Energie. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Energie ist bedeutend und nach Tausenden von Metern zu berechnen, während die der Schwingungswucht nur eine sehr geringe ist. Da nun ein Metall nicht vollkommen elastisch ist, aber dieser Vollkommenheit mehr oder minder nahe kommt, so wird man beide Bewegungsvorgänge in den Leitern antreffen, die Bewegung der Wärme und der elektrischen Energie.

71 Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der letzteren kann man auf einem sehr einfachen Wege vergrößern, indem man die Energie mehrerer Massenteilchen auf eines überträgt und dadurch dessen v vergrößert. Dies geschieht in den Transformatoren. Sie enthalten eine primäre Spirale mit großem Querschnitt, durch welche die elektrische Energie in vielen nebeneinander herlaufenden Fäden hindurchgeleitet wird. In ihnen müßte sich die Energie in Schwingungswucht umsetzen, wenn sie nicht auf andere Bahnen übergeführt werden könnte. Diese Bahnen bietet die zweite Spirale mit parallel gerichteten Windungen von kleinem Querschnitt. Durch das trennende Zwischenmedium Luft, Öl wird die Energie übertragen, wobei ein mehr oder minder großer Prozentsatz in Wärme umgesetzt wird. Die übergeführte Energie

verteilt sich gleichmäßig auf die zur Verfügung stehenden Spiralwindungen. Es werde die Annahme gemacht, daß der Querschnitt der Windungen der zweiten Spirale hundertmal so klein wie die der ersten ist, daß aber dafür von diesen hundertmal so viel Windungen vorhanden sind. Dann wird eine Windung der zweiten Spirale hundertmal so wenig Stromfäden enthalten wie eine der ersten. Dafür wird aber den Atomen eines solchen Stromfadens, der durch sämtliche Windungen der zweiten Spirale hindurchläuft, hundertmal so oft ein elastischer Stoß erteilt: d. h. die Energie der Bewegung, die von Atom zu Atom springt, in einem solchen Stromfaden ist hundertmal so groß geworden. Diese Bewegungsenergie bleibt auch bestehen in einem Drahte, der an die zweite Spirale angeschlossen wird, um den Strom anderswohin zu leiten. Die Masse des Drahtes m, der zur Übertragung der Energie erforderlich ist, wird durch die Anzahl der Stromfäden bestimmt; sie ist daher hundertmal so klein wie in der ersten Spirale, und das v^2 ist hundertmal so groß. Bezeichnet man mit m die bewegte Masse eines Atoms, multipliziert mit der Anzahl der Stromfäden in der zweiten Spirale, mit v die Geschwindigkeit der Bewegung in jedem einzelnen Atom des Stromfadens, so stellt $^1/_2\, mv^2$ die Längswucht der elektrischen Energie dar. Diese Längswucht ist dann, abgesehen von den unvermeidlichen Wärmeverlusten, dieselbe wie vorher. Das gleiche gilt auch von der Drehwucht. Man kann daher sagen: Was im Transformator an Masse der Energie verloren geht, wird an Geschwindigkeit gewonnen. Will man in diesem Falle m die Strommenge oder Stromstärke nennen und die Spannung $^1/_2\, v^2$ proportional setzen, so hat man den Satz, daß das Produkt aus beiden der Energie proportional bzw. gleich ist. Aber Strommenge und Spannung haben eine andere Bedeutung. Die Spannung ist die Energie der Einheit der elektrischen Masse und m ist die Anzahl dieser Einheiten.

Nun ist der Vorgang in einem Transformator, z. B. in einem einfachen Induktionsapparat, nicht so einfach, wie es nach den bisherigen Bemerkungen erscheinen könnte. Denn die Überführung der elektrischen Energie in die zweite Spirale ist an die Bedingung geknüpft, daß der primäre Strom intermittiert: Er durcheilt beim Eintreten die erste Spirale mit dem v seiner Energie und füllt sie im Verlaufe ganz mit Energie. Das v bewirkt das Überspringen der Energie in die zweite Spirale. Aber wenn die ganze erste Spirale gleichmäßig mit elektrischer Energie angefüllt ist, dann ist diese keine freie mehr, wenigstens größtenteils gebunden, indem die einzelnen Energien sich gegenseitig im Schach halten. Dann hat die Gesamtenergie nicht mehr die notwendige Geschwindigkeit, um den Raum zwischen erster und zweiter Spirale zu überspringen. Statt auf die zweite Spirale überzutreten, setzt sie ihre einseitig gerichtete translatorische Energie in die verworren gerichtete Energie der Wärme um. Dann kann zwar immer neue Energie aus der Energiequelle nachströmen, aber nur in einem Maße, das der Umwandlung in Wärme entspricht; aber diese neue Energie wird wieder gebunden, so daß ein Übertritt dieser Energie in die zweite Spirale nicht möglich ist. Die Stromunterbrechung macht diese Aufstauung der Energie in der ersten Spirale unmöglich und verhindert dadurch den größten Teil der Umwandlung in Wärme. Stromschließung und Öffnung sind demnach die Grundbedingung für das Entstehen des Induktionsstromes und anderseits beruht die Wirtschaftlichkeit des Induktionapparates auf der Schnelligkeit des Schließens und Öffnens des primären Stromes. Es ist daher die große Sorgfalt verständlich, die man bei ihrem Bau den Stromunterbrechern zugewandt hat.

Dabei mag hier eines solchen Apparates gedacht werden, der aus einer Spirale mit vertikaler Achse besteht und in einer unteren Spitze endigt, die

in Quecksilber taucht. Wird der primäre Strom durch sie geleitet, so hebt sich die Spitze aus dem Quecksilber heraus und unterbricht dadurch den primären Strom, worauf die Spitze wieder in Quecksilber taucht, um den unterbrochenen Strom zu schließen. Man hat das Heben der Spitze auf eine Anziehung der Stromwindungen im Unterbrecher aufeinander zurückgeführt, indem sich gleichgerichtete Ströme anziehen sollen. Man kann aber eine sehr viel einfachere Erklärung geben, die rein mechanisch ist und von den hypothetischen anziehenden und abstoßenden Kräften der Elementarquanten absieht. Die von Atom zu Atom springende elektrische Energie muß den Windungen des Drahtes folgen und dadurch eine Zentrifugalwirkung auf die Kreiswindungen ausüben und damit den Kreisdurchmesser vergrößern. Dies führt zwangsweise eine Hebung der Unterbrechungsspitze herbei.

72 Die Versuche mit dem Induktor zeigen die weitere auffällige Erscheinung, daß zu dem einmaligen Durchlauf des Stromes durch die erste Spirale zwei verschiedene Induktionsströme gehören, ein Schließungsstrom, der mit dem primären Strom entgegengesetzte Richtung hat, und ein Öffnungsstrom mit gleicher Richtung. Lenz hat diese Erscheinung in die Regel zusammengefaßt, daß die erregten Ströme die sie hervorrufenden Ströme in ihrer Wirkung hemmen. Aber diese Regel enthält keine Erklärung; und eine befriedigende Begründung dieser auffälligen Tatsache ist mir nicht bekannt geworden. Daher lege ich die folgende vor.

Die elektrische Energie springt von der ersten Spirale auf die zweite über. Die andere Vorstellung, daß sie in der ersten verschwinde, um in der zweiten unter Ausschluß des mechanischen Transportes wieder aufzutauchen, ist zu mystisch, als daß sie jemals in der Wissenschaft hätte Beachtung finden dürfen. Diese Annahme würde, im Grunde genommen, zulassen, daß Energie an einer Stelle vernichtet und zugleich an anderer Stelle wieder neu geschaffen werden könne. Jedenfalls drängt die Tatsache, daß sich die elektrische Energie in der ersten Spirale mit bestimmter Geschwindigkeit bewegt, um in der zweiten diese Bewegung in veränderter Form aufzunehmen, zu der Annahme, daß sie diese Geschwindigkeit zum Übergang von der ersten zur zweiten Spirale verwertet. Die Energie einer Drahtwindung in der ersten Spirale eines Induktors verteilt sich auf mehrere Windungen der zweiten Spirale. Während sie von der ersten von allen Stellen einer Windung fast gleichzeitig auf die entsprechenden Windungen der zweiten Spirale überspringt, steht die Bewegungsrichtung dieser Energie senkrecht zu der Richtung dieser Windungen. Dieser Richtung kann sie aber nicht folgen, da sie in der Umwicklung des Drahtes mit einem Isolierungsmittel einen Widerstand findet, während sie sich längs den Windungen der Spule ohne Hemmung bewegen kann. Dazu stehen nur zwei Richtungen zur Verfügung, die beide senkrecht zur Energierichtung stehen; und man sollte daher vermuten, daß es dem Zufall überlassen bleibt, welche Richtung sie wählt. Da aber der Zufall tatsächlich ausgeschlossen ist, so muß ein gesetzmäßiger Anlaß die Richtung der Bewegung bestimmen. Dieser Anlaß braucht einerseits kein sehr starker zu sein, da beim labilen Gleichgewicht auch die kleinste Wirkung die Entscheidung für die Richtung der Bewegung bringen kann; anderseits muß er durch einen bestimmten physikalischen Vorgang bestimmt sein. Während nun der primäre Strom die Windungen seiner Spirale in derselben Richtung durchläuft, besteht für den Schließungs- bzw. Öffnungsstrom der Unterschied, daß in bezug auf den ersteren der primäre Strom den Stellen des Stromübergangs in die zweite Spirale immer nachdrängt, in bezug auf den letzteren sich von diesen entfernt; und darauf darf man die Erklärung des Unterschiedes der Richtung beider Induktionsströme stützen. Beim Schließungsstrom wird

jede Spiralwindung der zweiten Spirale durch die Zentrifugalwirkung des auftretenden Stromes erweitert und damit die nächstfolgende, in die der Strom noch nicht eingetreten ist, an die vorangehende herangezogen und von der weiterfolgenden entfernt. Dadurch erhält diese nächstfolgende eine Bewegung nach rückwärts und desgleichen der in ihr auftretende Strom. Dieser Vorgang wiederholt sich in sämtlichen Windungen der zweiten Spirale; daher haben die Ströme in sämtlichen diese rückwärtige Bewegung und geben dadurch den Ausschlag dafür, daß der Strom der zweiten Spirale die entgegengesetzte Richtung desjenigen in der ersten Spirale hat. Beim Öffnungsstrom verschwindet die elektrische Energie der ersten Spirale. Während dieses Verschwindens bildet sich gleichfalls ein Induktionsstrom, da auch diese Energie in die zweite Spirale übertritt. Dann nimmt aber jede Windung der zweiten Spirale, hinter der kein Induktionsstrom mehr überspringt, die ursprüngliche Stellung wieder ein und nähert sich der nächstfolgenden und transportiert damit den Induktionsstrom in der Richtung des primären Stromes, so daß er mit diesem gleiche Richtung hat. Die Windungen der zweiten Spirale werden nach dieser Auffassung beim Schließungsstrom entgegengesetzt der Richtung des primären Stromes verschoben, beim Öffnungsstrom in gleicher Richtung mit diesem; und der Richtung dieser Verschiebung entspricht die Richtung des Induktionsstromes selbst.

Diese Erklärung mag Mängel haben und demnach widerlegt werden; aber sie gibt dann wenigstens das Prinzip an, nach dem die später allgemein erkannte Erklärung gefunden wird. Jedenfalls ist schon jetzt die Möglichkeit einer rationalen Begründung des Stromwechsels in der zweiten Spirale gegeben und damit das Vertrauen gesichert, die Lenzsche Regel von der unwissenschaftlichen Verquickung mit einem in der Natur auftretenden Willen zu befreien.

73 Um die Richtigkeit dieser Darlegungen zu widerlegen, wird mancher geneigt sein, auf die Versuche hinzuweisen, die Ampère an seinem Gestell gemacht hat und durch die er zeigte, daß der elektrische Strom, der einen Draht durchfließt, auf einen anderen parallelen Draht, den gleichfalls ein Strom in gleicher oder entgegengesetzter Richtung durchfließt, anziehende oder abstoßende Wirkungen ausübt. Diese Erscheinungen sind eine wichtige Stütze gewesen für die Vorstellung, daß elektrische Ströme in die Ferne wirken und Anziehungen wie Abstoßungen ausüben, genau so wie die hypothetischen Elementarquanten. Aber im Grunde genommen, beweisen sie nicht das, was sie beweisen wollen, wenn man sich erinnert, daß zu Ampères Zeit die Annahme galt, daß durch einen Draht zwei entgegengesetzte Ströme, ein positiver und ein negativer, fließen sollte. Dann mußten die beiden entgegengesetzten Ströme des einen Drahts auf den positiven des anderen in entgegengesetztem Sinne wirken, so daß die Anziehung die Abstoßung aufhob; und die Einwirkung auf den negativen Strom war demselben Schicksal verfallen; und weder eine Anziehung noch eine Abstoßung durfte stattfinden. Nur wenn man in jedem Draht nur einen, und zwar in beiden denselben Strom annahm, so daß die Unterscheidung von positiver und negativer Elektrizität wegfiel, könnte die Hypothese, daß gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzte sich abstoßen, ernsthaft genommen werden. Es würden dann die Richtungen der Bewegungen der elektrischen Energie für diese Wirkungen verantwortlich gemacht werden, aber nicht die Verschiedenheiten zweier Elektrizitätsarten; aber dann hätte eben die bis jetzt geltende Annahme der beiden Elektrizitätsarten beseitigt werden müssen.

Nun ist das Ampèresche Gestell aus einem in einer Ebene viermal rechtwinklig gebogenen Draht gebildet; und in zwei einander gegenüberliegenden

Seiten fließt der Strom in entgegengesetzter Richtung. Daher sind die theoretisch möglichen Wirkungen beider Gestelle aufeinander recht kompliziert. Es können die Ströme im festen Gestell wie in dem beweglichen, sowohl in den horizontalen wie in den vertikalen Drahtstücken aufeinander einwirken. Meist betrachtet man nur die Einwirkung der Ströme in den Vertikaldrähten aufeinander unter Vernachlässigung derjenigen in den Horizontaldrähten, während doch die letzteren leicht in dieselbe gerade Linie fallen können, so daß eine Einwirkung des Stromes in der Richtung seiner Bewegung auf den Strom in dem entsprechenden Drahtstück des anderen Drahtes diejenige in den vertikalen Drahtstücken vollständig überwiegen könnte. Ferner ist hervorzuheben, daß die Ströme in den rechteckigen, wenn auch abgerundeten Ecken des Gestells ihre Richtung ändern und daß diese Änderung mit einer Abgabe von Energie verknüpft sein muß. Die letztere kann entweder in dem Drahte als Wärme haften bleiben oder auf die umgebenden Massen (Molekeln oder Elektronen) übertreten und dadurch das Zwischenmedium unmittelbar beeinflussen. Est ist dann sehr leicht möglich, daß die vom Zwischenmedium aufgenommene Energie die Bewegung des beweglichen Gestells veranlaßt, so daß die Ströme als solche keine direkte Beinflussung zeigen. Ob elektrische Energie in den Nachbarraum übertritt, ist meines Wissens nach gar nicht untersucht worden. Man kann die beiden Ampèreschen Gestelle durch Isoliermittel von der Umgebung abschließen, etwa durch Firnis oder Umwicklung mit Seide, und dann die Stromwirkungen aufeinander untersuchen. Man kann auch die Ecken allein oder die graden Drahtstücke allein, oder bei dem einen Gestell die horizontalen, beim anderen die vertikalen isolieren. Auch die Frage, ob die Luft etwas von der elektrischen Energie aufnimmt, können Versuche in freier Luft im Vergleich zu solchen unter der Glasglocke auf dem Teller einer Luftpumpe entscheiden. Wahrscheinlich ist, daß ein Übergang von elektrischer Energie auf das Zwischenmedium stattfindet. Dann ist die Bewegung des Gestells der Verlagerung von freier Energie zu verdanken, nicht aber einer Anziehung oder Abstoßung von Elektrizitätspartikeln; und eine Fernwirkung muß dann gänzlich ausgeschlossen werden. Jedenfalls genügen diese Bemerkungen, um zu zeigen, daß zurzeit noch keine genügenden Versuche gemacht sind, um die Vorgänge beim Ampèreschen Gestell aufzuklären; und im besonderen können Ampères Versuche nicht dazu verwertet werden, meine Auffassung der elektrischen Vorgänge zu widerlegen.

Am leichtesten dürfte man der Vermutung nachgeben, daß die elektrische Energie, die im und am Draht der beiden Gestelle sich fortbewegt, etwas von ihrer Wucht auf die umgebende Luft überträgt und Luftteilchen in ihrer Richtung mit sich reißt, so daß bei gleicher Stromrichtung in den genäherten Drahtstücken ein gewisses Luftvakuum zwischen diesen entsteht, dessen Ausgleichung durch zuströmende Luft den beweglichen Draht nach dem festen drängt, und bei entgegengesetzter Stromrichtung eine Luftstauung verursacht wird, deren Ausgleichung den beweglichen Draht von dem festen forttreibt.

74 Es wirft sich nun die weitere Frage auf, ob auf einem gegebenen Drahte unbegrenzte Mengen elektrischer Energie auf einmal übertragen werden können. Denkbar ist dies nur, wenn m und v unbegrenzt gesteigert werden können. Für v ist die Grenze in der Schmelztemperatur gegeben; genau liegt sie unterhalb derselben, dort wo das Metall anfängt, weich zu werden: für m liegt sie in der Anzahl der Stromfäden, die den gegebenen Querschnitt des Drahtes erfüllen können. Dabei sind m und v voneinander nicht ganz unabhängig, da von v auch der Querschnitt des Stromfadens mit abhängig ist. Nun ist es aber nicht ausgeschlossen, daß diese Grenze noch überschritten werden kann. Denn bisher ist angenommen, daß die Atome die kleinsten

Teile sind, die die Energie übertragen. Stehen dagegen noch kleinere Teile zur Verfügung, so kann an eine weitere Vergrößerung der Energieübertragung in der Zeiteinheit gedacht werden. Als solche kleineren Teile hat die Physik die Elektronen nachgewiesen. Ihre Strombahnen können einen viel kleineren Querschnitt als die der Atome haben, und das v ihrer Bewegung kann viel größer werden, ohne daß ihr Anprall die Atome auf die Schmelztemperatur bringt. Nun wenn viele Elektronen in einem Bündel dicht aneinander gedrängten Kathodenstrahlen Atome und Molekeln treffen, kommt ein Aufglühen zustande.

75 Wenn die elektrische Energie Schraubenwucht ist, so kann sie sich nur als Bewegungsenergie äußern. Ehe sie aber diese Bewegung zeigt, muß sie als Schwingungswucht vorhanden, jedoch verhindert sein, als Längswucht den Ort im Raume zu wechseln. Diese Behinderung ist nur möglich, wenn der Ort der Energieaufspeicherung von Isolatoren umgeben ist. Nun sind die Metalle im allgemeinen geeignet, infolge der regelmäßigen Anordnung ihrer Atome beide Arten der Schraubenwucht aufzunehmen und fortzuleiten. Ein Isolator darf eine solche gleichmäßige Anordnung der kleinsten Teile, Atome, Molekeln, Molekelkomplexe nicht besitzen; die Lage derselben zueinander muß eine möglichst verworrene sein. Solche verworrene Lage findet sich einerseits in der Haut der Tiere und Pflanzen, die gerade die Aufgabe haben, das Abfließen der Wärme aus dem Körper zu verhindern, anderseits in gewissen Produkten des pflanzlichen und tierischen Körpers wie Seide und Kautschuk, die anfangs flüssig gewesen sind und beim Festwerden die wirre Lage der Molekeln im flüssigen Zustande beibehalten haben. An sie schließen sich die Flüssigkeiten und die Gase der unorganischen Welt an, bei denen jedoch die freie Beweglichkeit der Molekeln eine gewisse Leitung ermöglicht. Unter den Flüssigkeiten werden die zähflüssigsten die besten sein: daher ist Glas einer der besten Isolatoren für elektrische Energie.

Diese Stoffe sind gleichzeitig diejenigen, an denen man zuerst durch Reibung elektrische Eigenschaften wahrgenommen hat. Zwar hat man bei ihnen zur Gewinnung von Elektrizität erhebliche Arbeit aufzuwenden; die erzeugte Elektrizität bleibt aber an diesen Körpern haften, weil deren Beschaffenheit die Fortleitung verhindert. Die schwer beweglichen, wirr durcheinander liegenden Molekeln dieser zähflüssigen Stoffe erfordern zu einer Änderung der gegenseitigen Lage eine starke Einwirkung von außen, um den bisherigen Gleichgewichtszustand in einen anderen überzuführen; es gelingt auch nicht, die Molekeln sämtlich so zu ordnen, daß alle Längsbewegungen untereinander parallel sind und senkrecht zur geriebenen Fläche stehen. Solcher Molekeln gibt es immer nur einzelne, die aber dem Wahrscheinlichkeitsgesetz entsprechend annähernd gleichmäßig über die Fläche verteilt sind. Dazwischen liegen viele mit anderer Bewegungsrichtung. Aber die Nachbarmolekeln solcher ausgezeichneten Molekeln sind annähernd in dieselbe Lage zur Oberfläche gedreht, so daß ein Komplex von Molekeln entsteht, die sich gegenseitig in ihrer neuen Lage festhalten und deren Längswucht annähernd senkrecht zur Oberfläche gerichtet ist. Man versteht, daß gerade an diesen Stellen das Abfließen der Energie sich vollziehen muß, wenn es auch hier noch mit Schwierigkeiten verknüpft ist; und meist ist zur Entladung eines Nichtleiters eine unmittelbare Berührung des elektrischen Körpers mit dem Übertrager der Energie notwendig, welcher Weg auch gewöhnlich eingeschlagen wird.

76 Die mechanische Energie der Reibung ruft zwei Wirkungen hervor, eine Druckwirkung, welche senkrecht zur geriebenen Fläche steht, und eine parallel der geriebenen Fläche wirkende. Beide wirken vereint auf die Um-

lagerung der Molekeln ein. Während nun der reibende Körper an dem geriebenen vorbeigezogen wird, wird auf den geriebenen Körper Bewegung in der Richtung des reibenden, auf den reibenden dagegen in entgegengesetzter Richtung hervorgerufen. Man könnte nun glauben, daß dadurch die Drehungsrichtung der Molekeln auf der einen der geriebenen Flächen in entgegengesetztem Sinne wie auf der anderen beeinflußt werde und dadurch eine Polarität der Bewegungszustände in beiden Flächen zutage träte. Doch ist dieser Schluß nicht zwingend. Die Dimensionen der kleinsten Teilchen sind im Verhältnis zu den Dimensionen des reibenden Körpers so gering, daß jede mechanische Einwirkung, welche eine Molekel trifft, auch eine ganze Reihe benachbarter Molekeln erfaßt. Daher kann die Richtung des Strichs. da er beide Seiten der Molekel treffen kann, keinen Einfluß auf den Drehungssinn ausüben. Entscheidend wird die Neigung der Molekeln sein, sich in einem bestimmten Sinne zu drehen, wenn die Schwingungswucht in Schraubenwucht übergeht; und zwar wird die Molekel so gedreht, daß ihre Schraubenwucht von der Oberfläche des Körpers entweichen kann. Außerdem kommt der Widerstand in Frage, den die umgebenden, sich mit der Molekel im Gleichgewicht haltenden Teilchen auf die erstere ausüben. Dieser Widerstand wird bei dem einen Stoff größer sein als bei dem anderen. Bei dem letzteren wird daher der Einfluß der Reibung zuerst auftreten; er wird daher den Sinn der Reibungswirkung bestimmen. Den Sinn dieser Drehung wird dann auch der schwerer bewegliche Körper in seinen ausgezeichneten Molekeln annehmen, da rotierende Molekeln sich gleichsinnig parallel zu stellen streben. Daher haben die ausgezeichneten Punkte beider Flächen. solange sie parallel aufeinander liegen, dieselbe Drehungsrichtung.

Entfernt man nun die geriebenen Flächen voneinander und stellt sie nebeneinander in dieselbe Ebene, so stehen die Längswuchten der ausgezeichneten Punkte beider Flächen senkrecht zur Oberfläche. Die Drehwuchten beider Körper auf ihren Oberflächen haben aber entgegengesetzte Richtungen. Die daraus sich entwickelnden Schraubenwuchten haben also entgegengesetzte Polarität; die Körper sind daher nach der bisherigen Bezeichnung als entgegengesetzt elektrisch zu bezeichnen. Dann ziehen zwei Körper mit entgegengesetzten Drehwuchten an ihrer Oberfläche einander an. weil sie, einander gegenübergestellt. gleichsinnige Drehwucht haben. Nach dieser Betrachtung entscheidet der Umstand, welcher Stoff der Reibung den geringsten Widerstand bietet, den Sinn der Drehungswucht, also die Art der Elektrizität. Daher müssen sich die Stoffe nach ihrem Widerstand gegen die Reibung in eine Widerstandsreihe (Spannungsreihe) einreihen lassen von der Beschaffenheit, daß jeder weichere, mit dem härteren gerieben, einen bestimmten elektrischen Zustand und der härtere den entgegengesetzten Zustand annimmt, wobei nur noch zu bestimmen ist, welcher der beiden Zustände als positiv elektrisch zu bezeichnen ist.

77 Auch die Einwirkung eines elektrischen Nichtleiters auf einen Leiter läßt sich auf Grundlage der neuen Auffassung verständlich machen, wenn man dem Satze, daß gleichgerichtete Drehungswuchten in parallelen Ebenen diese Ebenen zu nähern streben. den zweiten hinzufügt, daß gleichgerichtete Drehwuchten in d e r s e l b e n Ebene aufeinander abstoßend wirken. Stehen sich zwei Träger mit gleichgerichteten Drehwuchten gegenüber, so werden die zwischen ihnen sich bewegenden Luftmolekeln durch die gleichen Bewegungen beim Anstoßen hinausgeschleudert, während die Träger, wenn sie beweglich sind, durch Stöße von außen zusammengedrängt werden. Und wenn auf derselben Fläche Molekeln nebeneinander in demselben Sinne rotieren, so haben die benachbarten Teile dieser Molekeln gerade entgegen-

gesetzte Bewegungen, so daß die beim Zusammenstoß mit dazwischenfahrenden Molekeln durch diese auseinandergetrieben werden.

Bei der Berührung des elektrischen Leiters mit dem Nichtleiter geht von der Schwingungswucht des letzteren etwas auf den Leiter über. Die Längswucht führt diese Menge bis an die äußerste Grenze der Bewegungsmöglichkeit, also an den abgewandten Oberflächenteil. Da sich von hier aus die Wucht nach allen Seiten verteilen kann und muß, so schiebt sie sich von da über die ganze Oberfläche fort, indem sich die in demselben Sinne drehenden Wuchten gegenseitig abstoßen. Dabei werden auch Teile der Wucht nach dem Berührungspunkte von Leiter und Nichtleiter geschoben. Dann hat die zurückgebliebene Drehwucht des Nichtleiters die entgegengesetzte Richtung wie die dem Berührungspunkte sich nähernde des Leiters; infolgedessen muß Abstoßung eintreten und tritt schon ein, bevor sich die unmittelbar anliegende Stelle der Leiteroberfläche mit Energie geladen hat.

Ist die Reibung sehr stark gewesen, so kann sich ihre Wirkung auch auf die tieferen Teile der geriebenen Platte erstrecken; ja man kann sich den Fall denken, daß die Wirkung bis zur anderen Seite der Platte durchdringt. Dann ist die Bewegungsrichtung der Drehwucht durch die ganze Platte hindurch dieselbe; die Elektrizität erscheint, von beiden Seiten der Platte betrachtet, daher als entgegengesetzt.

Auch auf die Umgebung kann die Schwingungswucht eines mit Elektrizität geladenen Körpers einen Einfluß ausüben, vorausgesetzt, daß der Zwischenraum nicht leer ist. Dabei ist es für den Augenblick gleichgültig, ob man als den Raum erfüllendes Medium die Luft oder den hypothetischen Äther oder die nachgewiesenen Elektronen annimmt. Durch die Längswucht wird eine Oberflächenmolekel senkrecht zur Oberfläche hin und her bewegt und diese Bewegung auf das Medium übertragen. Bei der ersten, von der Oberfläche abgewandten Bewegung der Molekel wird in ihr aufgespeicherte Energie verbraucht, um den Energiemangel, der sie an die Nachbarmolekeln bindet, zu überwinden. Da ihre Energie hierzu nicht ausreicht, diese aber auf Null nicht erhalten bleiben kann, wenn die ganzen umgebenden Massen höhere Energie haben, so fließt von diesen die abgegebene Energie zurück und läßt sie dadurch zurückschwingen. Dadurch gelangt das Medium auch in einen Schwingungszustand, dessen Schwingungen aber, entweder der räumlichen Ausdehnung folgend, dem Quadrat der Entfernung proportional abnehmen oder dieselbe Stärke behalten, jedoch voneinander durch Zwischenräume getrennt sind, die mit der wachsenden Oberflächenvergrößerung gleichfalls wachsen. Im letzteren Falle würde sich um den elektrischen Körper ein Zustand ausbilden, der den Faradayschen Kraftlinien entspricht. Dann könnte den Kraftlinien eine reale Existenz zugeschrieben werden. Diese Kraftlinien oder die abnehmenden Schwingungen können einen Leiter treffen und den elektrischen Zustand des ersten Körpers unter gewissen Modifikationen übertragen. Dieser Vorgang ist die Influenz.

78 Auch die Erscheinungen der Thermoelektrizität bieten der neuen Auffassung keine Schwierigkeit der Erklärung. Jedes Element hat bei einer gegebenen Temperatur einen bestimmten Schwingungszustand von gegebener Längs- und Drehwucht. Stoßen an einer Lötstelle zwei verschiedene Metalle mit ihren verschiedenen Schwingungszuständen zusammen, so muß ein Ausgleich dieser Zustände eintreten; das geschieht dadurch, daß der Unterschied der Längs- und Drehwuchten abgestoßen wird, d. h. es entsteht eine Schraubenbewegung. Mit derselben ist eine Abnahme der Energie an der Lötstelle verbunden; und es muß demnach eine Abkühlung eintreten. Aber an der zweiten Lötstelle bildet sich aus demselben Grunde gleichfalls

eine Schraubenbewegung aus, die in dasselbe Metallstück eintritt und daher der ersten Schraubenbewegung mit gleicher Größe entgegenwirkt, so daß sich ein Gleichgewichtszustand ohne Strom im ganzen Kreise einstellt. Ist dagegen die Wärme an den beiden Lötstellen verschieden, so ist der Abfluß der Schraubenwucht an der Lötstelle höherer Temperatur stärker als an der der niedrigeren. Es kommt dann zu einer nachweisbaren und meßbaren Differenzwirkung, die der Temperaturdifferenz proportional ist. Die dabei auftretende Temperaturabnahme an der wärmeren Lötstelle ist nicht nachzuweisen, weil die von außen zufließende Wärme die höhere Temperatur dauernd erhält. Diese kann aber gezeigt werden, wenn man in den Kreis eines Thermoelementes z. B. von Wismut und Antimon einen elektrischen Strom einschaltet. Bei diesem Thermoelement geht bei der Erwärmung einer Lötstelle der (positive) elektrische Strom vom Wismut zum Antimon. Wird nun in dies Thermoelement bei gleichwarmen Lötstellen ein Strom eingeleitet, der gleichfalls durch die Lötstelle vom Wismut zum Antimon geht, so tritt an der Lötstelle die zuerst von Peltier beobachtete Temperaturerniedrigung ein. Der eingeleitete Strom hebt den von der anderen Lötstelle entgegengesetzt kommenden Strom auf, läßt also den von der ersten Lötstelle sich absondernden Strom mit seiner Temperaturerniedrigung zur Entwicklung kommen. Die Vernichtung des Thermostromes der zweiten Lötstelle durch den von außen eingeleiteten Strom ist mit der dort zur Erscheinung kommenden Temperaturerhöhung verknüpft.

79 Bei den nahen Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus, die beide die Eigenschaft der Polarität zeigen, drängt sich die Frage auf, wie der Magnetismus nach der neuen Auffassung verstanden werden kann. Soll er auf Schwingungswucht zurückgeführt werden, so ist der Umstand besonders zu berücksichtigen, daß er auf seinem Träger dauernd haftet, während die Elektrizität von einem Leiter sofort und von einem Nichtleiter im Laufe einer mehr oder minder langen Zeit abfließt. Diese Fähigkeit des Eisens und einiger anderer Elemente, den magnetischen Zustand in sich festzuhalten, kann man am leichtesten begreifen, wenn man annimmt, daß die Längswucht der Eisenschwingungen gleich Null ist, so daß ein Entweichen derselben bei Berührung mit anderen Körpern nicht möglich ist. Die Drehwucht wirkt dann allein und wird das Atom in zirkularer Bewegung erhalten. Während die übrigen Elemente im festen Zustande Oszillationen um einen Gleichgewichtspunkt machen, rotiert das Eisenatom in festem Zustande ständig in demselben Sinne um einen gegebenen Mittelpunkt. Dabei ist es nicht notwendig, daß jedes Eisenatom diese Rotation mitmacht; es mag unter ihnen auch manche geben, die oszillieren und daher von der Schraubenwucht der Elektrizität unbeeinflußt bleiben. Der schwache Magnetismus von Nickel und einigen anderen Elementen kann darauf zurückgeführt werden, daß verhältnismäßig wenige Atome in ihm rotieren und die übrigen oszillieren. Auch läßt sich die Frage aufwerfen, ob das Eisen dieses Zirkulieren seiner Atome bei jeder Temperatur aufweist oder ob es eine niedrige Temperatur gibt, bei welcher das Zirkulieren in ein Oszillieren übergeht. Im ersten Falle müßte weiches Eisen auch bei den niedrigsten Temperaturen durch den elektrischen Strom in einen Magneten übergeführt werden; im zweiten Falle würde der Strom bei einer gewissen Temperatur versagen. Auch die schwach magnetischen Elemente verdienten, in eine solche Untersuchung einbezogen zu werden.

Liegen die Rotationsachsen der Eisenatome wie beim weichen Eisen oder beim nicht magnetischen Stahl wirr durcheinander, so heben sich die richtenden Wirkungen nach außen gegenseitig auf, so daß weder anderes weiches

Eisen noch das übrige äußere Medium beeinflußt wird. Sind aber alle Achsen parallel gerichtet wie beim Magnet, so unterstützen sich alle Bewegungen in ihrer Einwirkung auf das Medium und von da auf ein anderes Stück Eisen. Es liegt hier derselbe Vorgang vor wie bei der elektrischen Influenz; und daraus folgen die bekannten Sätze, daß sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige Pole abstoßen. Auf diesen Punkt soll im folgenden Abschnitt noch einmal zurückgekommen werden.

Mit diesen wenigen Ausführungen, die elektrischen Wirkungen durch Schraubenwucht zu erklären, muß ich mich begnügen. Wenn sie auch nicht ausreichen, die Gesamtheit der Erscheinungen zu umfassen, so sind sie doch der bisher geltenden Anschauung dadurch überlegen, daß sie den Vorgängen eine einfache, mit unseren anderen mechanischen Vorstellungen in Übereinstimmmung stehende Ursache zugrunde legen, während die bisherige der Elementarquanten mit ihren Anziehungen und Abstoßungen überhaupt keine Erklärung bietet, so lange diese Wirkungen nicht auf Verlagerung von Energie zurückgeführt sind.

80 Zum Schluß soll an dem Beispiele des Gewitters gezeigt werden, wie die neuere Auffassung den elektrischen Erscheinungen gerecht zu werden sucht. Nachdem Franklin gezeigt hatte, daß der Blitz ein elektrischer Funke ist, hat man das Gewitter zu erklären gesucht. Daß man dazu zunächst die Reibung heranzog, ist natürlich, weil man damals im wesentlichen nur Reibungselektrizität kannte. Aber man gab diesen Weg auf, da man die gewaltigen Wirkungen des Blitzes mit seiner kolossalen Spannung nicht auf die Reibung zweier Luftmassen zurückführen konnte. Dann hat man die Verdampfung des Wassers, die durch Abkühlung die Wolken schafft, auch für die Gewitterbildung in Anspruch genommen, da die Gewitter mit Regen verknüpft sind. Und diese Bemühungen haben sich noch 30 Jahre über die Zeit der Prägung des Satzes von der Erhaltung der Energie hinaus erstreckt, obgleich kein einziger Versuch, durch Verdampfung Elektrizität zu erzeugen, Erfolg hatte, und die Frage daher nahe lag, ob nicht prinzipielle Gründe, die mit dem Energieprinzipe zusammenhängen, die Aussichtslosigkeit begründen.

Nun setzt die Erklärung des Gewitters infolge der Verdunstung voraus, daß erstens die Wärme die flüssigen Wassermolekeln in dampfförmige verwandelt und daß sie zweitens diese mit Elektrizität lade. Die Annahme, daß die Wärme zwei verschiedene Aufgaben nebeneinander löse, mußte auf ihre Möglichkeit geprüft werden. Dabei war von der Erfahrung auszugehen, daß in der Natur bei der Störung des Gleichgewichtes zweier Energien immer der unter den gegebenen Umständen möglichst stabile Zustand erreicht wird. Von den beiden Aufgaben der Dampfbildung und der Elektrisierung führt die erstere zu dem stabileren Zustand; denn der Wasserdampf kann bei der Temperatur seiner Entstehung dauernd bestehen bleiben; die Elektrizität sucht sich mit der der Umgebung möglichst auszugleichen. Bei der ersteren ist die freie Energie der die Verdampfung veranlassenden Wärme verschwunden; die zweite ist dagegen freie Energie, die als solche an die Umgebung abfließen muß, bis das Energiegleichgewicht wiederhergestellt ist. Daher ist nicht anzunehmen, daß neben der Dampfbildung noch eine Elektrisierung eintritt; vielmehr wird die hierzu erforderliche Wärme eher gleich zur Dampfbildung verwandt, anstatt daß zu demselben Zwecke der Weg über die Elektrisierung benutzt wird. Es wird also nur Dampf gebildet, was auch das Ergebnis aller Versuche gewesen ist.

81 Worin ist dann aber der Grund für die Gewitterbildung zu suchen? Doch nur in solchen Vorgängen in der Natur, die freie Energie erzeugen.

Nun ist das Gewitter eine Erscheinung der Wolkenbildung; daher sind für dasselbe die freien Energien in Anspruch zu nehmen, die bei der Wolkenbildung auftreten. Hierfür kann man drei Ursachen nennen: 1. Die Kondensation des Dampfes zu Wasser, 2. die Umwandlung der Wassertropfen zu Eis und 3. die Bildung von Großmolekeln und Molekelkomplexen. Die Bildung von Wasser aus Dampf und von Hagel aus Wasser machen große Mengen von Energie frei, so große, daß bei plötzlichen Wolkenbildungen diese Energie sehr wohl imstande ist, die Gewittererscheinungen zu erklären. Aber dann sollte man bei jeder Wolkenbildung ein, wenn auch manchmal nur schwaches Gewitter erwarten; und doch treten, abgesehen von den Tropen, die Gewitter verhältnismäßig selten auf.

Gewöhnlich wird die bei der Wolkenbildung frei werdende Energie allein dazu benutzt, um die kältere Luft, die meist die Ursache der Wolkenbildung ist, zu erwärmen; und so weit als diese Wärme bis zum neuen Energiegleichgewicht erforderlich ist, wird die Umwandlung des Dampfes in Wasser durchgeführt; es tritt daher keine freie Energie auf. Daneben ist noch eine zweite Möglichkeit, Wassertropfen zu bilden, vorhanden, die Druckzunahme. Geht diese in einem geschlossenen Gefäße vor sich, so erwärmt sich das Gas, während die Gefäßwandungen die alte Temperatur noch beibehalten, dann aber den Wärmeüberschuß des Gases aufnehmen. Wenn aber der Dampf nicht von, schnell Wärme entziehenden Mitteln umgeben ist, sondern wie im Luftmeere von anderer Luft, so wird die Energie während der Druckvermehrung nicht fortgeführt; sie kann dann auf den Wasserdampfmolekeln haften bleiben, ohne daß sich diese zu Wassertropfen zusammenballen. Wenn die Druckzunahme ganz allmählich vor sich geht, ist die Erhaltung der Dampfmolekeln in ihrer Gesamtheit durchaus nicht unwahrscheinlich. Denn von den einzelnen Molekeln ist keine vor der anderen bevorzugt oder benachteiligt, allerdings ändern sich die Geschwindigkeiten nach verschwindend kurzer Zeit, dann wird es häufig vorkommen, daß zwei benachbarte Dampfmolekeln so geringe Geschwindigkeit haben, daß sie sich zu einer Doppelmolekel zusammenlegen können. Aber die Aufwärmung der einen oder beider erfolgt in so kurzer Zeit, daß eine dauernde Aufeinanderlagerung nicht möglich ist. Es fehlt eben die dauernde Entziehung von Energie an e i n e r Stelle, so daß die Möglichkeit besteht, in den Dampfmolekeln freie Energie anzuhäufen. Diese Möglichkeit kann durch Versuche nachgeprüft werden. Wenn man nämlich Dampf etwas oberhalb seiner Verflüssigungstemperatur in einem Gefäß langsam zusammenpreßt und gleichzeitig für eine ausreichende Erwärmung der einschließenden Wand sorgt, so daß ein Abströmen der Dampfwärme an die Gefäßwand unmöglich gemacht wird, so müßte der ganze Dampf unter dem Kondensationsdruck erhalten bleiben.

Aus dem labilen Gleichgewichtszustande kann eine Erschütterung, ein Windstoß, ja der Flug eines Vogels den Dampf zur teilweisen Verflüssigung bringen unter Abgabe der dabei frei werdenden Energie. Diese wird im allgemeinen die Wassermolekeln erwärmen und dadurch den Vorgang zu einem Ende führen. Anders würde es aber sein, wenn die gewonnene kinetische Energie Schraubenenergie wäre, und zwar solche, deren Bewegungen parallel zueinander gerichtet wären. Diese würde auf die Nachbarschaft gleichfalls einen richtenden Einfluß ausüben und könnte ein ganz großes Gebiet in dieselbe Bewegungsart hineinziehen. Je schneller diese Gleichordnung der Bewegungen vor sich geht, um so stärker wird die Wirkung auf die Umgebung sein. Je größer die Druckdifferenz ist, innerhalb welcher die reine Dampfform erhalten wird, und je kräftiger daher nach der Stö-

rung des Gleichgewichts der neue Gleichgewichtszustand aufgesucht wird, um so größer muß die freie Schraubenenergie werden. Erstreckt sich das Gebiet des labilen Gleichgewichts in große Tiefe bis zu den unteren Luftschichten, so wird sich die Schraubenenergie bis nahe an die Erdoberfläche ausbreiten, auf die noch unter ihnen liegenden Schichten richtend einwirken und schließlich zum Erdboden eine schmale Gasse bahnen. Auf dieser kann sich die Schraubenwucht fortbewegen, am leichtesten gegenüber einem Leiter, der sie aufnimmt und in die Erde führt. Nach den Stellen der Luft, welche ihre Schraubenenergie verloren haben, strömt infolge der Störung des Gleichgewichts neue Schraubenenergie, so daß die freie Energie eines großen Gebietes auf einmal beseitigt werden kann. Diese Entladung ist der Blitz. Das Aufleuchten rührt von dem Glühen derjenigen Luftmolekeln her, an denen sich die Schraubenwucht reibend vorbeibewegt. Die Bahn des Blitzes gibt die Richtung und den Weg an, auf dem der Ausgleich der freien Energie erfolgt.

Die Achsen der Schraubenenergie, die über ein großes Luftgebiet verteilt ist, können an verschiedenen Stellen auch verschiedene Richtungen haben, wenn sie nur an derselben Stelle annähernd dieselbe Richtung aufweisen. Sie können nach der Erde und von ihr weg gerichtet sein; im letzteren Falle wird die nach oben gerichtete Schraubenenergie nicht so leicht einen Ausgleich in Gestalt eines Blitzes finden, da kein Leiter vorhanden ist, der die eingetretene Gleichgewichtsstörung durch Fortführung der freien Energie bis zu ihrer Erschöpfung unterhält. Der Ausgleich findet dann nicht an einem Punkte, sondern an vielen Punkten statt; es entsteht der Flächenblitz. Auch für den Kugelblitz läßt sich dann eine Erklärung geben. Der Ort seiner Entstehung ist die untere Spitze der mit parallel rotierenden Molekeln erfüllten Luft. Die Längswucht dieser Schraubenenergie ist noch nicht kräftig genug, um die umhüllende Luftschicht zu durchdringen und ihr die eigene Rotationsbewegung aufzuzwingen. Sie verzehrt sich zum Teil durch Reibung an dieser Lufthülle, zumal wenn die letztere um die Spitze der Schraubenenergie rotiert, und besonders wenn diese Spitze sich weiter verjüngt, so daß die Wirkung der Reibung bis zum Glühen der kleinen Luftmenge gesteigert werden kann. Dabei braucht die Störung des Gleichgewichts in der ganzen Masse nicht so groß zu sein, daß sich die ganze Energie aus der Spitze sofort entlädt. Die Kugel kann daher längere Zeit im glühenden Zustand verharren und dabei die Bewegung der unteren Spitze des zur Entladung bereiten Raumes anzeigen, bis schließlich die Berührung mit einem Leiter die Fortführung der ganzen freien Energie mit all den zerstörenden Begleiterscheinungen des Kugelblitzes veranlaßt.

82 Die zweite Art, freie Energie zu gewinnen, liefert der Übergang des Wassers aus dem flüssigen in den festen Zustand. Auch dieser wird meist dadurch veranlaßt, daß der Flüssigkeit von außen Wärme entzogen wird, z. B. durch Zuführung kalter Luft, so daß genau soviel Wärme unter Verwandlung des Wassers in Eis abgegeben wird als die Erwärmung der kälteren Luft bis zur Gewinnung des Energiegleichgewichtes erfordert. Also auf diesem Wege wird keine Energie frei, die etwa den Blitz liefern kann. Aber es gibt daneben noch die Unterkühlung des Wassers unter den Gefrierpunkt hinunter, bei der die Wassermolekeln ebenso in einem Zustand des labilen Gleichgewichts sind wie die Dampfmolekeln beim Überdruck. Die in ihnen aufgespeicherte, noch gebundene Energie kann durch starke Erschütterung oder durch einen hineingeworfenen Eiskristall zur freien werden, die sich bei den bisherigen Versuchen jedoch immer in Wärme umgesetzt hat. Aber es läßt sich nicht die Möglichkeit bestreiten, daß sie als elektrische Energie

auftreten könnte, wenn sie von Anfang an Schraubenwucht wäre und ihr Gelegenheit gegeben würde, schnell zu entweichen. Ein dahingehender Versuch würde eine erhebliche wissenschaftliche Bedeutung haben. Würde er die ausgesprochene Vermutung bestätigen, so würde die Hagelbildung während des Gewitters in ursächlichem Zusammenhang mit dem Gewitter stehen. Bis jetzt kann man wohl einen solchen vermuten, da das Gewitter freie Energie braucht, die Hagelbildung freie Energie abgeben kann.

83 Die dritte Möglichkeit, freie Energie zu liefern, ist die Bildung von Großmolekeln und Molekelkomplexen. Hier kommt im wesentlichen die Bildung des Nebels aus Staub und diesem angelegten Wassermolekeln in Frage. Daß bei seiner Bildung Energie frei wird, ist nicht zu bestreiten; nur fragt es sich, wo sie ausgeglichen wird, schon bei Entstehung des Nebels oder erst später, und ob sie bei der Betätigung des Blitzes mitwirkt. Die einfachste Erklärung der Nebelbildung besteht darin, daß kalte, Staubkörner führende Luft sich mit wärmerem gesättigten Wasserdampf mischt, und daß die Abkühlung, die die kalte Luft mit ihren Staubkörnern auf den Dampf ausübt, die Anlagerung der H_2O-Molekeln an den Staubkern veranlaßt. Dann wird die entstehende freie Energie zur Temperaturerhöhung des Kerns verwendet, wodurch das Energiegleichgewicht wieder hergestellt wird; also bleibt für die Gewitterarbeit keine Energie übrig. Dann ist die schwarze Färbung der Gewitterwolken, die dem Dunkel des berüchtigten Londoner Nebels entspricht, nicht als Kennzeichen aufzufassen, daß die Energie des Blitzes dem Entstehen der Molekelkomplexe ganz oder teilweise zu verdanken ist; sondern sie zeigt nur an, daß eine mit Staubteilen durchsetzte und stark abgekühlte Luft mit dampfgesättigter warmer Luft zusammengetroffen ist. Doch können diese Nebelteile mittelbar zur Gewitterbildung beitragen. Die Abgabe der Energie der H_2O-Molekeln an den Staub hat deren Geschwindigkeit vermindert, so daß sie nicht mehr frei, sondern in ihrer Bewegung an den festen Kern gebunden sind; und man darf annehmen, daß sie um diesen in parallelen Ebenen rotieren, schon allein aus dem Grunde, um sich in ihren Bewegungen nicht gegenseitig zu stören. Und wenn zwei benachbarte Staubteilchen in gleicher Weise Kerne von Molekelkomplexen werden, so werden sie ihre Rotationsachsen parallel stellen; und ebenso werden weitere Nebelteile verfahren. Je schneller aber die Nebelbildung vor sich geht, um so leichter wird sich die labile Lage der Nebelteile zueinander erhalten. Dann hat die Bildung der Molekelkomplexe für das Gewitter nur die Bedeutung, daß deren Rotationsachsen über einen großen Raum hinweg parallele Lagen einnehmen und dadurch auch andere freie Energien veranlassen, sich in derselben Weise zu orientieren, bis die Gelegenheit einer elektrischen Entladung die freie Energie fortführt.

Aber diese Bedeutung kann ausreichen, die Entstehung des Gewitters verständlich zu machen. Denn es ist bereits gefolgert, daß, wenn die bei der Erhöhung des Luftdruckes und bei der Hagelbildung frei werdende Energie Schraubenwucht ist und zugleich parallele Achsen hat, die Vorgänge des Gewitters rein mechanisch gedeutet werden können. Nun ist es im höchsten Grade wahrscheinlich, daß jede, aus einer Bewegungsbeschränkung entstehende freie Energie Schraubenwucht ist, da es ebenso unwahrscheinlich ist, daß sie von Anfang an nur Drehwucht oder Längswucht allein ist. Erst wenn sie an der Betätigung der Bewegung gehindert wird, setzt sie sich in Schwingungswucht, d. h. Wärme, um. Anderseits wirken die gleichmäßig geordneten Molekelkomplexe des Nebels darauf hin, daß sich auch die Achsen dieser Schraubenwuchten parallel stellen. Damit sind aber beide Bedingungen für die Blitzentladung erfüllt.

Diese Erklärung hat den Vorzug der Einfachheit und Anschaulichkeit und stützt sich auf längst vertraute Vorstellungen und kann schon dadurch einen bestimmten Grad der Wahrscheinlichkeit für sich in Anspruch nehmen. Je mehr Tatsachen durch sie verständlich gemacht werden, um so mehr wird die Wahrscheinlichkeit wachsen. Sie hat den Vorzug, zu Versuchen anzureizen, die ihre Anwendbarkeit stützen oder erschüttern; und wenn sie auch nicht in allen Punkten haltbar sein sollte, so darf doch vermutet werden, daß sie den wirklichen Vorgängen näher kommt als irgendeine bisherige.

7. Abschnitt.

Die potentielle Energie.

84 In den vorausgehenden Abschnitten ist gezeigt worden, daß die osmotische und die elektrische Energie, die bisher als potentiell angesehen wurden, als rein kinetisch aufgefaßt werden können; und im besonderen ist dargelegt, daß bei der Bildung der Großmolekeln Energie frei wird. Diese freie Energie — gebundene kann keine Arbeit leisten — ist neben der Verbrennungswärme die wichtigste Energiequelle, aus der die Arbeitsleistungen des organischen Körpers bestritten werden. Es drängt sich nun die Frage auf, welche anderen Energien gleichfalls als kinetisch zu erweisen sind.

Halten wir Musterung unter den verschiedenen Energien, so sind lebendige Kraft, Wärme, Schall schon längst als kinetisch angesehen, auch das Licht, soweit die Newtonsche Emissionstheorie anerkannt wurde und noch wird; die Undulationstheorie schließt eine solche Auffassung aus, da sie einen masselosen Äther zum Träger der Lichtenergie macht. Doch wird die Wissenschaft meines Erachtens bald wieder zur Emissionstheorie zurückkehren. Dann bleiben als potentielle Energien im wesentlichen übrig: Gravitation, Kohäsion, Oberflächenspannung, Elastizität, Verbrennungsenergie, chemische Affinität, Adhäsion, Kapillarität. Mit Ausnahme der Gravitation, deren Deutung als kinetische Energie mich in diesem Abschnitt zuweit führen würde, sollen die übrigen kurz betrachtet und von ihnen gezeigt werden, daß sie im Grunde auf einem Energiemangel beruhen, im Vergleich zu dem Zustande der Körper, den diese hatten, als sie die genannten Eigenschaften noch nicht zeigten.

85 In bezug auf die Kohäsion nimmt die geltende Vorstellung an, daß in dem Körper, etwa einem Stück Eisen, eine Kraft enthalten sei, die Kohäsionskraft, die die einzelnen Atome des Eisens zusammenhalte, und die überwunden werden müsse, um die Atome voneinander zu trennen. Eine Kraft kann nur an ihrer Wirkung, ihrer Arbeit erkannt werden. Demnach muß das Eisen der Sitz einer Energie sein, die diese Arbeit leistet. Und da diese Energie nicht als kinetisch wahrgenommen wird, wird sie als potentiell angesehen.

Wird nun zu dieser Energie durch Erwärmung kinetische hinzugefügt, so wird die Gesamtenergie vergrößert; denn Energien sind ihrer Natur nach positive Größen und daneben unzerstörbar. Nun zeigt aber die Beobachtung, daß die Wärme die Kohäsion des Eisens vermindert. Man muß also schließen, daß die Wärme einen Teil der Kohäsionsenergie in Wärme überführt. Kühlt man das Eisen ab, so steigt die Kohäsion wieder, also geht Wärme in Kohäsion zurück. Wenn man ferner das ganze Stück Eisen zum Schmelzen bringt, muß fast die ganze Kohäsion bis auf einen kleinen Rest im flüssigen Eisen beseitigt sein. Führt man dann das Eisen auf die Anfangstemperatur zurück, so wird es fest; und gleichzeitig stellt sich die alte Kohäsion ein, obgleich sie fast ganz entfernt worden war. Wie ist nun dies neue Auftreten der Ko-

häsion zu erklären? Das ständige Erwärmen und Erkalten muß die Umwandlung von Kohäsionsenergie in Wärme und umgekehrt hervorrufen. Da aber nach dem zweiten Wärmesatz von Clausius bei der Umwandlung einer Energie in eine andere ein Teil der ersten als Wärme auftritt, so müßte bei diesem Prozeß allmählich die ganze Kohäsionsenergie in Wärme übergeführt werden; und man könnte so den Körper von jeder Kohäsion befreien; und bei der darauffolgenden Abkühlung müßte der Körper ohne jede Kohäsion bleiben, eine Folgerung, die mit aller Erfahrung in Widerspruch steht.

Nimmt man ferner einen elastischen Eisenstab, klemmt ihn, vertikal gehalten, am unteren Ende fest und biegt den Stab durch seitlichen Druck am oberen Ende krumm, so überträgt man, wie vorher durch Wärme, jetzt durch Druck auf ihn Energie. Diese Energie kann man durch Entfernen der Hand nachweisen; dann schlägt der Stab in die Gleichgewichtslage zurück und darüber hinaus, um in vielen Schwingungen die aufgespeicherte Energie allmählich abzugeben. Klemmt man aber das auf die Seite gedrückte obere Ende des Stabes gleichfalls fest, so ist auf ihn dauernd Energie übertragen. Diese ist nach der geltenden Auffassung potentiell, wenn nicht etwa durch das Biegen die Temperatur des Stabes erhöht sein sollte. Dies letztere ist aber nicht anzunehmen, da man jeden Augenblick die zweite Klemme lösen kann und sofort die Schwingungen des Stabes beobachtet, während ein nicht gespannter, aber erwärmter Stab durch die Erwärmung keine Spannung erhält. Wie verhält es sich nun mit der Kohäsion dieses gespannten Stabes? Nimmt sie ab oder nimmt sie zu? Krümmt man gleiche Stäbe verschieden stark und klemmt sie an beiden Enden fest, so kann man an der am stärksten gekrümmten Stelle die Stäbe durch Aufschlagen mit dem Hammer zu zertrümmern suchen. Die Erfahrung zeigt, daß der am stärksten gespannte Stab am ehesten zerbricht. Demnach hat er an dieser Stelle die geringste Kohäsion. Die Dinge liegen also hier genau wie bei der Erwärmung. Will man das Aufschlagen des Hammers vermeiden, um der Hinzufügung einer anderen neuen Energie auszuweichen, so kann man die Enden des Stabes immer weiter durchbiegen, bis der Stab an der am stärksten gekrümmten Stelle zerbricht. Dann ist die auf den Stab übertragene Energie, abgesehen von der Zerreißungsarbeit an der Bruchstelle, noch als kinetische Energie vorhanden und äußert sich in der Bewegung der beiden Bruchenden. Diese Stücke haben dieselbe Kohäsion wie am Anfang des Versuches: nur an der Bruchstelle ist sie aufgehoben. Warum ist die Kohäsionsenergie der Stücke nicht nach der Bruchstelle hingeflossen, um das stets aufgesuchte Energiegleichgewicht herzustellen und dadurch den Bruch zu verhindern? Die Kohäsionsenergie soll doch den Zusammenhang der Teile erhalten und versagt gerade an der entscheidenden Stelle. Dies ist doch rein unverständlich.

Dieses Verhalten läßt starke Zweifel aufkommen, ob die Kohäsion überhaupt eine Energie oder Kraft ist. Anderseits lassen sich die besprochenen Erscheinungen sehr einfach erklären, wenn man in der Kohäsion nicht eine Energie, sondern den Zustand eines Körpers sieht, der auf eine Abgabe von Energie gegründet ist. Eine derartige Auffassung stimmt mit unseren allgemeinen Ansichten über den Aggregatzustand der Körper überein. Der feste Zustand wird durch Aufnahme von Wärme in den flüssigen und dieser in gleicher Weise in den gasigen übergeführt und umgekehrt der gasige durch Abgabe von Wärme in den flüssigen und weiter in den festen zurückverwandelt. Die verschiedenen Aggregatzustände unterscheiden sich also durch einen verschiedenen Vorrat an Wärmeenergie. Sie unterscheiden sich aber auch durch verschieden große Kohäsion; und zwar entspricht der größeren Kohäsion der geringere Energievorrat. Man kann daher die Kohäsion als eine, auf einer

Energieabnahme beruhende Eigenschaft des Körpers ansehen, so daß die Kohäsion aus einem Energiemangel besteht und die Größe der Kohäsion von der Größe des Energiemangels abhängt. Die geringste Energie, die ein Körper enthalten kann, ist gleich Null und kommt allen ruhenden festen Körpern bei — 273 °, dem absoluten Nullpunkt der Temperatur, zu, wo die Atome gar keine Eigenbewegung haben: in diesem Zustande besitzt er die größte Kohäsion. Die geringste Kohäsion hat er im Gaszustande, nämlich Null. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Kohäsion bis zum Verflüssigungspunkte und weiter bis zum Vergasungspunkte ab; und bei jeder Temperatur zwischen dem letzeren und dem absoluten Nullpunkte mißt der Unterschied zwischen der Energie des Vergasungspunktes und der Wärmeenergie des Körpers die Größe der Kohäsion. Was man als Kraft des Zusammenhangs der Atome des festen Körpers angesehen hat, die von außen überwunden werden muß, ist die zur Vergasung notwendige, aber fehlende Energie, also ein bestimmter Energiemangel.

Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkte die besprochenen Vorgänge, so hebt die Erwärmung des Eisens den vorhandenen Energiemangel mehr und mehr auf; die Kohäsion vermindert sich; kühlt man den Körper wieder ab, so wächst sie. Wird die Feder durch Übertragung von Druckenergie gespannt, so nimmt die Kohäsion ab. An den Stellen größter Krümmung ist die Druckenergie am stärksten angehäuft; demnach wird dort die Kohäsion zuerst auf Null gebracht, so daß sich die Eisenstücke trennen. Im Augenblick der Trennung kommt die im Eisen aufgehäufte freie Energie zur Wirkung und verteilt sich gleichmäßig über die Bruchstücke und setzt sie in Bewegung. Wird die Feder vor Eintritt des Bruches entspannt, so geht sie in den Anfangszustand zurück.

Die auf den Stab übertragene Energie ist vorher kinetisch gewesen und muß nach unserer Vorstellung noch kinetisch sein. Um sie als solche verständlich zu machen, könnte man folgende Überlegung anstellen. An der Stelle der stärksten Krümmung sind die Atome einander stark genähert; daher sind bei gleichbleibender Temperatur die Wege zwischen zwei Zusammenstößen kürzer, so daß in der Zeiteinheit mehr Zusammenstöße stattfinden müssen; dies erfordere aber den von außen zugeführten Zuwachs an Energie. Bei dieser Auffassung müßte die Energiezufuhr gerade an der inneren Seite der Krümmung am stärksten sein, während auf der äußeren Seite infolge der Streckung eine Verminderung zu erwarten wäre. Aber die Erfahrung zeigt, daß die äußerste wie die innerste Schicht des gekrümmten Stabes gleichmäßig am stärksten mit Energie geladen werden, da ja in einer der beiden, je nach der Stärke der Druck- oder Zugfestigkeit, der Bruch beginnt, und daß in der neutralen Fläche gar keine Energieauffüllung erfolgt. Da nur in dieser letzteren Fläche die Abstände der Atome dieselben bleiben wie im Ruhezustande, so ist die Größe der aufgenommenen Energie mit der Abstandsverschiebung in Beziehung zu bringen und muß daher auch eine Funktion des Abstandes des Atoms von der neutralen Schicht sein. Mit dieser Abstandsverschiebung ist eine Umformung des Raumes verknüpft, innerhalb welches sich das einzelne Atom bewegt, um seine Wärmeschwingungen auszuführen. Man darf annehmen, daß dieser Raum im Ruhezustande für alle Atome derselben Eisensorte der gleiche ist, etwa ein Würfel. Würde der Massenmittelpunkt des Atoms innerhalb dieses Raumes im Ruhezustande irgendeine Linie auf einer Kugeloberfläche beschreiben, so würde er sich nach der Pressung bzw. Dehnung auf einer eiförmigen Fläche bewegen mit einer stetigen Änderung des Krümmungsradius seiner Bewegungslinie. Um bei dieser Bewegung dieselbe mittlere Geschwindigkeit, die der gegebenen Temperatur

entspricht, einzuhalten, ist eine größere kinetische Energie nötig, so daß von außen solche zugeführt werden muß. Nach deren Beseitigung schlägt das Atom wieder die Bahn auf der Kugeloberfläche ein und nimmt die alte Ruhelage mit dem alten Abstand der Schwingungsmittelpunkte zweier Atome ein. Je stärker die Deformation des Bewegungsraumes für das Atom wird, desto größer wird die übertragene Energie sein. Diese ist aber nach dieser Auffassung rein kinetisch.

Die übertragene Energie ist frei und hat das Bestreben, in gebundene überzugehen. Ihre Arbeit besteht in der Umlagerung der Atome gegeneinander, damit diese ihre Schwingungen genau wie vorher ausführen können, also in einem unverzerrten Raume. Dazu bedarf es einer längeren Zeit; dann wird die Feder lahm, wie jede Hausfrau weiß, die eine Wäschemangel mit Federdruck anwendet und die Entspannung nach dem Gebrauche vergessen hat. Aus dem Vorhergehenden ergeben sich auch die Grenzen für die Verwendbarkeit der Feder. Sie darf nicht überlastet werden, um den Bruch, die völlige Aufhebung der Kohäsion, zu vermeiden; und sie darf nicht zu lange belastet werden, damit sie nach der Entspannung die frühere Gleichgewichtslage noch vorfindet. Dagegen hat sie den Vorzug, freie Energie schnell aufzunehmen und noch schneller abzugeben.

Die in den Berechnungen der Statik eine so große Rolle spielenden Spannungen, die als innere Kräfte vor der Belastung geschlummert haben und durch die Belastung zur Tätigkeit gekommen sein sollen, sind nichts anderes als die auf die Unterlage übergegangene freie Gravitationsenergie, die so lange nicht zu einer äußerlich sichtbaren Arbeitsleistung kommt, als nicht der im festen Körper vorhandene Energiemangel behoben ist, und die sich auf die Unterlage gesetzmäßig so verteilt wie die berechneten Spannungen es fordern.

Nun bleibt noch e i n e Frage, die vielleicht schon mancher sich als Einwurf auf meine Anschauung zurechtgelegt hat, zu beantworten übrig. worauf es beruht, daß derselbe Stoff, z. B. Eisen, je nach seiner Bearbeitung bei derselben Temperatur verschieden große Höchstspannungen aufweisen kann. Wenn die Größe der Kohäsion durch die Größe der Energieabgabe bestimmt wird, so müßten alle Eisensorten bei gleicher Temperatur dieselbe Kohäsion besitzen, was unzweifelhaft falsch ist; oder ihre Energieabgabe müßte verschieden groß sein. Dies letztere ist aber vorstellbar, wenn angenommen wird, daß bei bestimmten Abkühlungsvorgängen nicht alle im Eisen befindliche Energie abfließt, die bei der gegebenen Temperatur abfließen könnte. Ein solcher Vorgang kann als Unterkühlung aufgefaßt werden, wie z. B. beim unterschwefligsauren Natrium. Genau wie dies kann auch Eisen abkühlen, ohne daß die ganze mögliche Energie wirklich abgegeben wird. Dann bleiben in ihm Nester größerer Energie zurück als der gegebenen Temperatur entspricht. An diesen Stellen bedarf es später keiner so großen Zufuhr äußerer Energie, um die Kohäsion zu überwinden, so daß der Körper hier am ehesten zerdrückt, zerrieben, zerrissen werden kann. Je gleichmäßiger die Energie beim Abkühlungsvorgange abfließt, um so größer ist der Energiemangel zu erwarten; je langsamer also die Abkühlung vor sich geht, um so größer wird die Kohäsion werden. Vollkommen elastisch dürfte ein Stoff sein, der bei jeder Temperaturabnahme ein Maximum der Energieabgabe zeigt. Nun ist das technische Eisen überhaupt kein homogener Körper, sondern ein Gemisch oder eine Verbindung aus Eisen und Kohle; und der Prozentgehalt beider wie auch die Anlagerung der Teile, ob auf chemischer oder rein mechanischer Einwirkung beruhend, bestimmt die Verschiedenheit der Eisensorten; auf sie dürfte das mehr oder minder große Abfließen der Energie zurückzuführen sein.

86 In gleicher Weise wie die Kohäsion kann man versuchen, auch die chemische Affinität als eine Eigenschaft der Stoffe aufzufassen, die auf einer Energieabgabe beruht, nur daß der Ausgangspunkt, von dem aus diese Abgabe zu rechnen ist, nicht der Vergasungspunkt, sondern die Temperatur ist, bei welcher das freie Atom mit anderen Atomen oder Atomkomplexen eine Verbindung eingeht. Bei dieser, für jeden Vorgang bestimmten Temperatur haben die zu einer Verbindung zusammentretenden Atome einzeln eine bestimmte kinetische Energie: bei der Vereinigung werden diese Energien zusammen auf den neuen Körper übertragen, so daß dieser eine erhöhte Temperatur im Vergleich zu seiner Umgebung besitzt. Der Energieüberschuß fließt auf die Umgebung ab, bis ein Ausgleich stattgefunden hat. Dann hat die entstandene Molekel weniger Energie als die Bestandteile zusammen vorher besessen haben. Soll sich die Molekel in die ursprünglichen Komponenten wieder zerlegen, so muß die abgegebene Energie neu zugeführt werden; und die Komponenten sind so lange aneinander gebunden, bis die ganze Zufuhr geleistet ist. Diese notwendige Zufuhr mißt die Stärke des Aneinanderhaftens, welche Affinität genannt wird. Und da diese Zufuhr genau so groß ist als die bei der Molekelbildung abgeflossene Energie, so kann auch die letztere als ein Maß der Affinität verwertet werden. Sind nun zwischen gegebenen Stoffen mehrere Verbindungen möglich, so wird diejenige gebildet, bei deren Bildung unter den gegebenen Umständen die größte Energiemenge frei wird. Diese Menge kann aber bei den einzelnen Verbindungen verschieden groß sein. Dann wird die größte Energiemenge, die überhaupt bei einer Verbindung der betreffenden Elemente frei wird, als das Maß der chemischen Verwandtschaft angesehen.

Die beim chemischen Prozeß abgeflossene Energie nennt man allgemein die Verbrennungswärme. Nach der vorliegenden Auffassung ist sie ein Teil der kinetischen Energie, die in den isolierten Atomen vor der Verbrennung enthalten gewesen war und zwar derjenige, der als freie Energie an die Umgebung abgeflossen ist. Daraus folgt, daß, je mehr Atome zu einer Molekel zusammentreten, um so größer die Verbrennungswärme ist, daß diese auch von der Höhe der Verbindungstemperatur abhängig ist und daß die Verbindung dann um so stabiler sein muß und selbst der Einwirkung hoher Temperaturen widersteht. Dies gestattet einen Schluß auf die Bildung der festen Erdoberfläche. Bei der Abkühlung des Magmas konnten zuerst diejenigen Verbindungen entstehen, die sich aus vielen Atomen zusammensetzen und deren Verbindungstemperatur sehr hoch ist; denn die große Wärmeabgabe verhinderte, daß sie trotz der hohen Allgemeintemperatur wieder in Atome zurückverfielen. Dies sind aber die Silikate, Phosphate, Karbonate, die ja auch den größten Teil der festen Erdkruste bilden.

Sind die, die chemische Verbindung bildenden Elemente nicht im Atomzustande, sondern im Molekularverband, so ist die Verbrennungswärme die Differenz zwischen der bei der Bildung der chemischen Verbindung aus den Atomen abgegebenen Wärme und derjenigen, die aufgewendet wird, um vorher den ursprünglichen Molekularverband zu lösen. Doch liegen hier die Verhältnisse nicht so einfach; und erst bei einer anderen Gelegenheit kann ich darauf zurückkommen.

Meine bisherigen Erklärungen physikalischer Vorgänge gehen nur von kinetischer Energie aus; diese bleibt auch bei und nach der Umlagerung kinetisch; und der Zustand, der durch Abgabe solcher kinetischer Energie erhalten wurde, kann durch Zuführung des gleichen Quantums kinetischer Energie in den früheren zurückgebracht werden. Das Bedürfnis, eine potentielle Energie anzunehmen, ist gar nicht aufgetreten.

87 Diese ganzen Darlegungen sind geeignet, auf die Aggregatzustände, besonders den flüssigen, ein neues Licht zu werfen. Diese unterscheiden sich voneinander durch einen mehr oder minder großen Energiemangel. Im Atomzustande ist die kinetische Energie der Elemente am größten. Gehen sie in den Molekularverband ein, so ist die abgegebene Energie eine sehr bedeutende; aber wenn sich die Elemente bei der Normaltemperatur im Gaszustande befinden, kommt uns die Größe der Energieabgabe gar nicht zum Bewußtsein: wir denken nicht an die abgegebene, sondern nur an die in ihnen noch enthaltene Energie, die wiederum groß ist gegenüber der des Festzustandes.

Der feste und der Gaszustand sind scharf charakterisiert: der feste durch die dauernde Erhaltung des Schwingungsmittelpunktes jedes einzelnen kleinsten Teilchens an derselben Stelle des Raumes und daher durch die ständige Nachbarschaft derselben kleinsten Teilchen und ferner durch deren unveränderte kinetische Energie bei unveränderter Temperatur, der gasförmige durch die freie Beweglichkeit der einzelnen Molekeln, deren Bewegungen von den Zusammenstößen mit anderen abhängen, die infolgedessen ihren Ort im Raume und ihre Nachbarschaften stetig ändern, und deren kinetische Energie zwischen Null und Unendlich schwankt. Zwischen ihnen nehmen die Flüssigkeiten eine Mittelstellung ein. Ihre Molekeln haben eine freie Beweglichkeit wie die Gase: aber sie ist wesentlich beschränkt; sie wechseln auch ihre Nachbarschaften, aber langsamer, sie schwanken auch in ihrem zeitlichen Energievorrat, aber in geringerem Umfange; und sie machen den Eindruck, als wenn sie aus festen und gasförmigen Bestandteilen gemischt wären.

Diese Auffassung erwächst von selbst, wenn man den Übergang aus dem gasigen in den flüssigen Zustand verfolgt. Durch Druckvermehrung oder Entziehung von Wärme gehen die Gase in Flüssigkeiten über. Durch die erstere mit ihrer Volumverminderung werden die Wege zwischen zwei Zusammenstößen kürzer, durch die zweite wird die mittlere Geschwindigkeit der Molekeln vermindert. Durch beide Vorgänge wird die Gleichheit der Bewegungen zweier Nachbarmolekeln gefördert, also die Wahrscheinlichkeit dieser Gleichheit erhöht. Haben aber zwei Molekeln gleiche Richtungen und gleiche Geschwindigkeiten und bewegen sich nebeneinander, so werden sie diese Bewegung auch beibehalten, wenn sie gegen eine feste Wand oder zusammen auf eine dritte Molekel oder auch zwei unter sich gleich gerichtete Molekeln stoßen. Gegen sie fliegen von allen Seiten andere Molekeln an; aber jede von beiden wirkt in bezug auf die andere als abwehrendes Schild, so daß die anfliegenden Molekeln nicht die Wirkung haben, die beiden voneinander zu trennen, sondern vielmehr näher zusammenzubringen. Von selbst können sie sich selbstverständlich nicht wieder trennen; sie bleiben daher zusammengekuppelt, als wenn sie eine einzige Molekel mit erhöhter Energie wären, und geben den Energieüberschuß an die Nachbarmolekeln ab, so daß der dadurch bedingte Energiemangel die beiden Molekeln noch fester aneinander knüpft. Doch bleibt dieser Zusammenhang immerhin noch ein loser. Gelingt es einer Molekel von großer Wucht, sich zwischen die beiden zu drängen oder treten Stöße auf in der Richtung der gemeinsamen Bewegung in gleichem oder entgegengesetztem Sinne, die nicht gleichzeitig auf beide wirken, so ist die Möglichkeit zu einer Trennung wieder gegeben. Aber während an der einen Stelle die durch gemeinsame Bewegung aneinander gekuppelten Molekeln auseinander gehen, vereinigen sich an einer anderen Stelle zwei gleichbewegte zu einer gekuppelten; und es wird immer ein bestimmter Bruchteil von Molekeln vorhanden sein, die nicht mehr die volle

Bewegungsfreiheit — wenn auch nur vorübergehend — haben. Diese Bewegungsbeschränkung ist das, was man bisher bei den Flüssigkeiten Kohäsion genannt hat. Sie zeigt sich schon bei den Gasen in der Nähe des Kondensationspunktes; sie nimmt stark zu bei der Bildung der Flüssigkeit, zumal wenn die Entziehung kinetischer Energie die Bildung gekuppelter Molekeln begünstigt.

Nun kann es dabei vorkommen, daß nicht nur z w e i Molekeln durch ihre gleiche Bewegungsart aneinander gebunden sind, sondern auch mehrere. Doch ist auch diese Bindung immer nur als eine vorübergehende anzusehen. Aber die so zusammengekuppelten Molekeln wirken als ein einziges Ganzes, äußern im ersten Augenblick eine größere Stoßkraft und haben, nachdem sie diese an die Nachbarmolekeln abgegeben haben, einen gesteigerten Energiemangel, so daß ihre Zerlegung in einzelne Molekeln erschwert ist. Infolgedessen hat die Kohäsion zugenommen.

Nach dieser Vorstellung bewegen sich beim Übergang aus dem gasigen in den flüssigen Zustand und während des ganzen flüssigen neben Einfachmolekeln viele Vielfachmolekeln, unter denen Doppelmolekeln, Dreifach-, Vierfach-, n-fach-Molekeln sind. Wenn auch ihr Zusammenhaften immer nur ein augenblickliches ist, so ist der Prozentsatz der verschiedenen Vielfachmolekeln außer von den Bedingungen des Druckes und Temperatur von der Zahl n abhängig und kann vielleicht durch die Wahrscheinlichkeitsrechnung ermittelt werden.

88 Um noch klarere Vorstellungen zu gewinnen, mögen die Verhältnisse beim Wasser näher betrachtet werden, da für dieses genaue Zahlen über die Aufnahme und Abgabe von Energie bei Änderung des Aggregatzustandes vorliegen. Beim Übergang von 1 kg Dampf von 100° in Wasser von 100° werden 537 Kal. frei, bei der Abkühlung des Wassers von 100° auf 0° 100 Kal., bei der Umwandlung des Wassers von 0° in Eis von 0° 80 Kal. Die gesamte, beim Übergang aus dem gasigen in den festen Zustand abgegebene Wärmemenge beträgt 717 Kal., und umgekehrt werden 717 Kal. verbraucht. Sie werden verbraucht, um die im festen Zustand zu gänzlicher Unselbständigkeit gezwungenen Molekeln zu völliger Unabhängigkeit zu bringen und daneben noch zwei andere Aufgaben zu lösen, einmal den äußeren Luftdruck zurückzuschieben, wozu 40,2 Kal. gebraucht werden, und daneben die Temperatur von 0° auf 100° zu erhöhen, wozu jedoch nur ein Teil der 100 Kal. verwandt wird, die bisher ganz auf Rechnung der Temperaturerhöhung gesetzt werden. Daß die bisherige Ansicht nicht richtig sein kann, geht schon daraus hervor, daß die Kohäsion mit wachsender Temperatur abnimmt, wofür Wärme aufgewandt werden muß, und daß das Dichtemaximum des Wassers nicht bei 0°, sondern nahe bei 4° liegt, daß also die Schmelzarbeit bei 0° noch nicht abgeschlossen ist. Dann ist auf die überraschende Tatsache hinzuweisen, daß die spezifischen Wärmen des Eises und des Wassers nicht gleich sind, sondern die erstere die Hälfte der letzteren ist. Denn die Molekularwärme des Wassers ist 18, die des Eises nur 9. An der starken Abweichung dieser Zahlen voneinander ist man bisher vorbeigegangen, ohne einen Grund dafür zu finden oder auch nur zu suchen, während es doch für jeden erstaunlich sei nmuß, daß die Umwandlung des Aggregatzustandes von einem Sprung der spezifischen Wärme begleitet ist, obwohl diese vorher und nachher konstant ist. Die Tatsache erklärt sich ungezwungen, wenn man die Erwärmungsenergie für Wasser und Eis als gleich ansieht und den überschießenden Betrag der spezifischen Wärme des Wassers auf Rechnung der Umwandlung der Festmolekeln in Gasmolekeln setzt. Dies macht für die Erwärmung von 0 auf 100° 50 Kal., so daß von den 717 Kal. 40,2 + 50 = rund

90 abzuziehen sind und demnach für die genannte Umwandlung noch 627 Kal. zur Verfügung stehen. Dann sind, um 1 Prozent der Molekeln zu isolieren, 6,27 Kal. erforderlich; daher liefern die 80 Kal. Schmelzwärme 12,76 oder rund 13 Prozent der ganzen Zerspaltung, die 50 Kal. während der Temperaturerhöhung auf 100° 8 Prozent, während die Verdampfungswärme die zur Selbständigmachung des Restes erforderliche Energie aufwendet. Bei 100° ist der Zusammenhang zwischen den Molekeln schon so gelockert, daß der Zerfall sofort eintritt, wenn die zur Selbständigmachung der Molekel erforderliche Wärmemenge zur Verfügung steht. Bei niedrigeren Temperaturen mag die Drehwucht, die den Schwankungen der fortschreitenden Geschwindigkeit nicht so schnell folgen kann und daher eine von jener unabhängige, allmählich mit der Temperatur wachsende Steigerung erfährt, die Größe noch nicht erreicht haben, die die Trennung der Molekeln überall ermöglicht. Durch sie mag der Abstand zweier Molekeln erst so groß werden, daß eine andere Molekel wie ein Keil zwischen sie fahren und die Trennung bewirken kann. Sie beträgt nicht ganz ein Viertel der ganzen Trennungsenergie und ist daher nicht zu unterschätzen.

Manchem wird die Vorstellung, daß im Wasser von 0° nur 13 Prozent der im festen Zustand unverschiebbar gelagerten Molekeln gelöst sind, ungeheuerlich erscheinen. Er wird der Ansicht sein, daß man die festen Brocken zwischen den isolierten Wassermolekeln sehen müßte und daß das Wasser aussehen müßte wie gestoßenes Eis, das in Wasser von 0° gelöst wäre. Aber diese gestoßenen Eisteile sind wirklich mächtige Brocken, in denen viele Billionen Molekeln enthalten sind, während das flüssige Wasser im Durchschnitt nur 7—8 Molekeln zu einer Vielfachmolekel vereinigt. Allerdings müssen darunter auch viele Einzelmolekeln sein, sowohl auf Grund der Wahrscheinlichkeit, als, weil sonst das Wasser kaum verdunsten könnte. Es mag daher sogar angenommen werden, daß von den genannten 13 Prozent auf die Einzelmolekeln 12 Prozent entfallen, so daß alle Vielfachmolekeln das letzte Prozent ausmachen. Dann hat jede Vielfachmolekel im Durchschnitt 88 Einzelmolekeln in sich. Dies ist aber gar nicht so erstaunlich, da bei Temperaturen unter 4° im Wasser kleine Eiskristalle, wenn auch nur von mehr als mikroskopischer Kleinheit angenommen werden müssen, um das Dichtemaximum bei 3.92° zu erklären; und in solchen minimalen Kristallen werden doch sicher Millionen von Molekeln vereinigt sein.

Die Zahl 88 ist daher nicht ohne weiteres als zu groß abzuweisen. Aber man kann ihr von der anderen Seite den Vorwurf machen, daß sie zu klein sei, daß ein Käfer, der über die Wasseroberfläche läuft, eine Nähnadel, die vorsichtig auf die Oberfläche gelegt wird, sofort untersinken müsse, da die kleinen Gebilde von durchschnittlich 88 Molekeln vor dem Gewichte des Käfers, der Nadel auseinanderweichen müßten: meine Anschauung kläre den bindenden Zusammenhang zwischen den Teilen nicht auf. Aber dieser bindende Zusammenhang ist grade in dem ständigen Austausche der Molekeln zu suchen, die in die Vielfachmolekeln eintreten und austreten, und in der Bildung von Vielfachmolekeln aus Einzelmolekeln. In einem Sandhaufen sind alle kleinen Körnchen, wenn sie auch noch so dicht aneinander liegen, voneinander getrennt und entbehren auch des Zusammenhanges selbst bei der Annahme von Kohäsionskräften; jedoch treten bei ihnen auch keine Molekeln ein und aus. Die Kohäsionswirkung in den Flüssigkeiten beruht eben auf diesem Austausche und ist eine unmittelbare Folge der Tatsache, daß den Molekeln von ihrer kinetischen Energie im Gaszustande ein Teil entzogen ist, so daß Vielfachmolekeln entstehen müssen, daß aber genügend Energie geblieben ist, uum nicht den festen Zustand annehmen zu müssen.

Mit denselben Gründen kann auch ein weiterer Einwand zurückgewiesen werden, daß nämlich die 12 Prozent Einzelmolekeln als Dampf aus der Flüssigkeit sofort entweichen müßten. Die Möglichkeit könnte nur dann vorliegen, wenn immer dieselben Molekeln Einzelmolekeln blieben. Aber eine solche, die eben aus einer Vielfachmolekel ausgetreten ist, wird in verschwindend kurzer Zeit wieder der Bestandteil einer neuen Vielfachmolekel; und die Wahrscheinlichkeit, daß eine solche lange genug isoliert bleibt, um aus der Lösung zu entweichen, ist verschwindend klein; und selbst an der Oberfläche bieten die Nachbarmolekeln der Loslösung erhebliche Schwierigkeiten. Daß sich aber an der Oberfläche besonders viele Einfachmolekeln ansammelten und aus diesem Grunde leichter entweichen könnten, ist ausgeschlossen; denn dies würde gegen die Wahrscheinlichkeit verstoßen, die für das Zusammentreffen von Ereignissen gilt, die voneinander unabhängig sind. Vielmehr ist auf Grund dieser Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß sich die Einzelmolekeln und Vielfachmolekeln gleichmäßig durch den Raum verteilen, und daß die die Teile zusammenhaltende Ursache, der zu einer gegebenen Temperatur unverändert zugehörige Energiemangel, makrosmisch sich ebenfalls gleichmäßig verteilt, während er mikrokosmisch von Molekel zu Molekel und in der Molekel von Zeit zu Zeit schwankt. In Rücksicht auf die Vielfachmolekeln nähert sich die Flüssigkeit dem festen Körper, in Rücksicht auf die Einzelmolekeln dem Gase. In Wirklichkeit ist sie ein Mittelding mit Kohäsion, die mit wachsender Temperatur abnimmt.

89 An diese Vorstellung muß man sich erst gewöhnen; aber sie beseitigt dann auch manche Schwierigkeiten. Z. B. löst sie die Frage, wie Gas und Flüssigkeit sich zueinander verhalten. Nach der bisherigen Vorstellung ist die Durchschnittsenergie eine Flüssigkeitsmolekel kleiner als die einer Gasmolekel. Daher müssen die Gase beim Zusammenstoß mit Flüssigkeiten an diese Energie abgeben und zwar dauernd. Theoretisch kann daher zwischen beiden kein Gleichgewicht bestehen; in Wirklichkeit wird es bei jeder Temperatur angetroffen. Um nun diese Wirklichkeit verständlich zu machen, hat man im Gas eine Übergangsschicht zwischen Flüssigkeit und Gas angenommen, in der die Energiedifferenz allmählich ausgeglichen wird. Mir fehlt das Verständnis für diese Übergangsschicht. Sie könnte vielleicht das Abfließen der überschüssigen Energie des Gases verlangsamen, aber nicht verhindern; und bei der großen Geschwindigkeit der Gase dürfte auch diese Verlangsamung kaum bemerkbar sein. Ganz anders wird die Sache, wenn die Flüssigkeit die von mir angenommene Beschaffenheit hat, daß jede Molekel — Einfach- und Vielfachmolekel — bei einer gegebenen Temperatur dieselbe durchschnittliche Energie hat, die dieselbe wie die einer Gasmolekel ist. Dann sind Gas und Flüssigkeit bei gleicher Temperatur immer im Energiegleichgewicht; und eine Übergangsschicht im Gase ist nicht nur überflüssig, sondern zugleich unmöglich.

90 Während nach der vorliegenden Auffassung die mittlere k i n e t i s c h e E n e r g i e der Wasserdampf- und Wassermolekeln bei gleicher Temperatur dieselbe Größe hat, sind die M a s s e n der kleinsten, sich selbständig bewegenden Teilchen des Wassers nicht alle gleich groß, da erst der Dampfzustand diese gleiche Größe mit sich bringt. Bisher hat aber die Vorstellung geherrscht, daß auch im flüssigen Zustande nur Einzelmolekeln und keine Molekelkomplexe vorhanden sind. Daher ist es begreiflich, daß die neue Auffassung vielerorts auf Widerspruch stoßen wird. Als begründet wird ein solcher nur anzusehen sein, wenn aus ihr Folgerungen abgeleitet werden, die auf Grund von anzustellenden Versuchen als unmöglich nachgewiesen

werden. Zur Untersuchung in dieser Richtung dürften sich die Lösungen fester Stoffe in Wasser eignen.

Die neue Auffassung fordert für die Bildung solcher Lösungen einen Zufluß von freier Energie, da ja der feste Körper unter sonst gleichen Bedingungen weniger Energie enthält als der flüssige, also diese fehlende Energie aufnehmen muß, um flüssig zu werden. Woher soll aber diese Energie kommen? Die einzige nicht hypothetische, zur Verfügung stehende Energie ist die Wärme der Körper. Aber da bei gleicher Temperatur die kinetische Energie der Molekeln des festen Stoffes sich im Gleichgewicht befindet mit der mittleren kinetischen Energie der Flüssigkeitspartikeln, kann aus dem Wasser keine Wärme zu dem festen Körper überfließen. Nur in dem einen Falle, daß sich mehrere Wassermolekeln zu e i n e r zusammenlegen und dadurch ihre Energien auf einen Träger vereinigen, kann und muß sich auf diesem Molekelkomplex freie Energie bilden. Ist diese groß genug, um eine Festmolekel aus ihrem Zusammenhange zu lösen, so ist das neue Gebilde als Flüssigkeitsmolekel anzusprechen. Sie hat dasselbe Maß freier Beweglichkeit wie jede andere Flüssigkeitspartikel des Wassers und muß auch in derselben Weise diffundieren.

Diese Betrachtung erklärt allerdings zunächst nur die Möglichkeit der Lösung fester Körper in Wasser, aber nicht deren Notwendigkeit. Um diese zu begründen, kann man den allgemeinen „Grundsatz" aufstellen, daß, wenn das Zusammenlagern mehrerer Energieträger zu einem die Bildung von freier Energie ermöglicht, die Zusammenlagerung notwendig erfolgen muß, oder etwas allgemeiner ausgedrückt, daß, wo freie Energie sich bilden kann, sie auch notwendig entsteht. Dieser „Grundsatz" wird stellschweigend in der Wissenschaft vielfach angewandt, dürfte aber, in dieser Form ausgesprochen, von mancher Seite zurückgewiesen werden. Mir scheint aber, daß man auch ohne diesen „Grundsatz" auskommen kann, wenn man nur die ständigen Schwankungen der Energie auf einem Träger bei Gasen und Flüssigkeiten heranzieht. Dann kann in der unmittelbaren Nähe einer Festmolekel die kinetische Energie einer oder mehrerer benachbarter Wassermolekeln so hoch gesteigert werden, daß ihr Energieüberschuß durch Abfluß auf die Festmolekel diese löst und dadurch aus ihr und den Wassermolekeln ein neuer Molekelkomplex gebildet wird, daß aber dessen unmittelbar darauffolgende Abgabe eigener Energie an Nachbarmolekeln ihn eine Entwärmung erdulden läßt, die nur durch Anlagerung von Wassermolekeln beseitigt wird. Die letzteren können nur Einzelmolekeln H_2O sein, da die, in den Vielfachmolekeln stehenden H_2O selbst an einem Energiemangel leiden, demnach zur Auffüllung eines anderen Energiemangels nicht geeignet sind. Dann sind beim Lösungsvorgang die größeren Molekelkomplexe als eine nicht mitwirkende, sozusagen tote Masse zu betrachten; und das wirkliche Lösen ist nur den 12 Prozent bzw. 20 Prozent Einzelmolekeln zu verdanken. Eine Lösung setzt nun in jedem einzelnen Falle eine bestimmte Menge von Einzelmolekeln voraus, die zur Verflüssigung des festen Körpers erforderlich ist. Sollte diese die 12—20 Prozent übersteigen, so müßte meine Auffassung falsch sein. Die Menge der zur Lösung und damit in Zusammenhang stehenden Ionenbildung erforderlichen Einzelmolekeln zu bestimmen, ist Aufgabe der physikalischen Chemie und kann ohne einen klaren Einblick in das Wesen der sogenannten osmotischen Energie nicht erledigt werden. Von ihm hängt auch die Entscheidung über die Berechtigung meiner Auffassung ab. (Siehe auch Nr. 26.)

91 Die neue Vorstellung spricht aber auch ihr Urteil über die vielfachen Versuche, die Gasgesetze auf die Flüssigkeiten auszudehnen und zu einem,

beide umfassenden Gesetze zu gelangen. Schon van der Waals Bestreben ging dahin; dann bemühte sich van't Hoff in gleicher Weise; und sein Gesetz über die Größe des osmotischen Druckes wurde allgemein als ein wesentlicher Schritt zu dem erstrebten Ziele angesehen. Ihm schlossen sich Arrhenius, Voigt, Dieterici an. Ja, die ganze Wissenschaft steht unter dem Banne der van der Waalschen Umformung der Boyle-Gay-Lussacschen Gasformel und erwartet von ihr das neue Gesetz. Aber wenn die Flüssigkeit kein Gas ist, sondern der Gaszustand nur einer ihrer Grenzzustände, so können die Gasgesetze auch höchstens an dieser Grenze noch gültig sein, ebenso wie an der anderen Grenze die Gesetze, die für den festen Zustand gelten. Für alle anderen dazwischenliegenden Zustände gelten weder die Gesetze des festen wie des Gaszustandes, soweit diese beiden nicht schon an sich übereinstimmen. Demnach ist der Versuch, die Gasgesetze auf die Flüssigkeiten auszudehnen, ein verfehlter. Um dies noch genauer zu zeigen, ist darauf hinzuweisen, daß die alten Gasgesetze schon vor dieser Grenze nicht mehr genau gelten; und darauf ist ja die Aufstellung der van der Waalschen Formel zurückzuführen, die aber nur für die Gase gilt, also bis zur Grenze, nicht darüber hinaus. Die Grenze wird aber in dem Augenblicke erreicht, bzw. überschritten, in dem die freie Beweglichkeit der Einfach- und Vielfachmolekeln so weit durch Energiemangel geschwächt ist, daß der Druck p nicht mehr dem Volumen umgekehrt proportional, sondern wie bei den festen Körpern fast Null ist, wenn also das Volumen nur durch die Wärme noch schwach verändert wird. Dann gilt eben die Gasformel nicht mehr, auch nicht in der van der Waalschen Form. Inwieweit diese Grenze durch die Gravitation mit bestimmt wird, bedarf noch einer besonderen Untersuchung.

92 Nun ist aber auch die berühmte Formel van der Waals meines Erachtens ganz unhaltbar. Ihre Fehlerhaftigkeit ist daraus zu erklären, aber auch zu entschuldigen, daß v. d. W. noch an Kohäsionskräfte glaubte und ihm die hier entwickelte Vorstellung eines Energiemangels völlig fern lag. Wäre er nun bei seiner ursprünglichen Formel $(v - b)\ (p + C) = RT$ stehen geblieben, so wäre gegen seine Entwicklung nichts einzuwenden; denn sie entspricht den Beobachtungen vollkommen. Um die Größe C zu bestimmen, wiederholt er eine Überlegung, die schon Laplace zur Berechnung der Kapillarität angewandt hat. C ist nach v. d. W.s Ansicht derjenige Teil des ganzen Druckes, der nicht als äußerer Druck zur Geltung kommt, sondern die Kohäsionskräfte aufzuheben hat. Diese Wirkung ist eine Anziehung, die von den Gasmolekeln untereinander ausgeübt wird; sie ist daher einmal der Menge der anziehenden und einmal der der angezogenen Molekeln proportional, also dem Quadrat der Masse, daher auch dem Quadrat der Dichtigkeit direkt und folglich dem Quadrat des Volums umgekehrt proportional: C ist demnach durch $\frac{a}{v^2}$ zu ersetzen, wo a eine Konstante ist. Dieser Ausdruck steht und fällt mit der Entscheidung, ob es Kohäsionskräfte gibt oder nicht: Wenn es keine gibt, kann er und damit auch v. d. W.s Formel nicht richtig sein. Und da ich die Kohäsion auf einen Energiemangel zurückgeführt habe, nicht auf hypothetische Kräfte, so habe ich ein Recht, sie als falsch anzusehen. Dann muß aber die Formel zu Folgerungen führen, die unannehmbar sind. Und wenn sich herausstellt, daß die Folgerungen sich grade aus der Tatsache ableiten, daß für C $\frac{a}{v^2}$ gesetzt ist, so darf man darin ein günstiges Zeichen für meine Auffassung der Kohäsion sehen.

Nun ergibt sich aber eine Folgerung aus der Formel, die diese von Anfang an hätte zurückweisen müssen. Die Gleichung ist nämlich in bezug

auf v vom dritten Grade; sie ergibt also für gegebene p und T drei verschiedene Werte für v. Zwar können von diesen drei Werten zwei komplex sein, also keinem wirklichen Zustand entsprechen; aber es gibt ein bestimmtes Intervall bei den Konstanten b, a, R, innerhalb welches alle drei reell sind. Dann muß es für dasselbe p und T drei verschiedene Volumina des Gases geben. Und das ist unmöglich. Dann wären die Vorgänge in der Natur nicht mehr eindeutig und das Kausalgesetz nicht mehr allgemein gültig. Man wüßte dann nie, auf welchen der drei Werte man bei einem bestimmten Versuche stoßen würde. Auch würde es vollständig unvorstellbar bleiben, wie die drei verschiedenen Werte von v bei gegebenem p und T nebeneinander bestehen könnten, wenn v ein Gasvolum ist, das eine unveränderte Gasmenge enthält. Man müßte auch das perpetuum mobile erster Art zugeben. Denn nach der bisherigen Annahme gelten die Vorgänge bei idealen Gasen als reversibel; man müßte also das Gas aus dem größten Volum v ohne Arbeitsaufwand in das kleinste überführen und dieses unter Arbeitsleistung durch Ausdehnung auf das größte bringen können. Schließlich müßte bei den vielen Versuchen mit Gasen schon einmal neben dem immer angetroffenen v das zweite und dritte zum Vorschein gekommen sein; und daß dies nicht geschehen ist, ist doch, wenn v. d. W.s Formel richtig ist, eine rein unverständliche Tatsache.

Dies hätte eigentlich v. d. W. selbst einsehen müssen. Aber der Rausch, in den die Formel damals die Gelehrtenwelt versetzte, wo zu gleicher Zeit Andrews den Übergang des Gases in den flüssigen Zustand unter bestimmten Drucken ohne merkliche äußere Kennzeichen sichtbar machte, so daß die Hoffnung, alle drei Aggregatzustände in demselben Volum darzustellen, das klare Abwägen trübte, und die dreifache Verschiedenheit des Volums eines Gases bei gleichem Druck und Temperatur für ebenso möglich gehalten wurde, macht es begreiflich, daß man die Gleichung allgemein ohne Widerspruch annahm. Ein anderes ist es aber, daß sich auch später kein Widerspruch geltend machte, auch nicht von solchen Physikern, die ihre Überlegungen in ein möglichst strenges mathematisches Gewand zu kleiden suchen. So hat M. Planck in seiner mechanischen Wärmetheorie weder an der v. d. W.schen noch an der ähnlich gebauten Clausiusschen Formel Anstoß genommen; wenigstens nimmt er sie als gegeben an, ohne sie zu kritisieren. Über die drei Wurzelwerte v innerhalb des Intervalles, in dem sie alle drei reell sind, kommt er mit dem Hinweis hinweg, daß e i n Wert auf den gasförmigen, der zweite auf den flüssigen Zustand führe, während der dritte auf einen nicht zu verwirklichenden Zustand hinweise, da dessen Kompressibilität negativ sei. Dieser Zustand habe zunächst nur theoretische Bedeutung. Aber diese theoretische Bedeutung scheint doch für die künftige Erkenntnis so wichtig zu sein, daß sie mit dem Worte „nur" nicht von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden durfte, sondern grade in den Mittelpunkt experimenteller und theoretischer Untersuchungen gezogen werden mußte. Kann man nicht versuchen, diesen dritten Zustand trotz seiner Labilität ebenso herzustellen, wie man einen am unteren Ende gestützten, aufrechtgehaltenen Stab — durch Verschiebung des Unterstützungspunktes — in seinem labilen Gleichgewicht erhalten kann? Und ferner: ist die Behauptung richtig, daß der zweite Wert von v auf den flüssigen Zustand führe? Es gilt doch die Gasformel für Gase und nicht für Flüssigkeiten; und wird dann der rechnungsmäßige Wert von v durch die Beobachtung des v im flüssigen Zustande bestätigt? Doch wohl nicht. Soweit ich sehe, ist keine dieser Fragen aufgeworfen und v. d. W.s Formel trotz ihrer Unmöglichkeit gläubig anerkannt worden. Wird sie aber auf Grund meiner Darlegung verworfen,

darf dann nicht auch der Rückschluß gemacht werden, daß die Annahme von Kohäsionskräften, die allein zu ihr geführt hat, eine irrige ist, und weiter, daß man Bedenken tragen muß gegen die Annahme aller Kräfte, die wechselseitig aufeinander wirken, um eine Arbeit zu leisten. Dann ist der Irrweg, den v. d. W. gegangen ist, derselbe, den die Wissenschaft in der Theorie der Elektrizität, des Magnetismus, der Gravitation, der Kapillarität gegangen ist. Und man darf meinen Versuch, andere Wege einzuschlagen, mit günstiger Voreingenommenheit verfolgen.

93 Die Verbesserung des Boyle-Gay-Lussaeschen Gesetzes muß demnach bei der Formel $(v - b)\ (p + C) = RT$ stehen bleiben; und es bleibt noch übrig zu untersuchen, von welchen Größen C wirklich abhängt. C ist der Druckzuwachs zu dem Druck p, der aus der Boyleschen Formel als zum Volum v zugehörig berechnet wird, so daß $p + C$ den wirklichen Druck darstellt. Dieser Druck (eigentlich Druckenergie) hängt von der Anzahl der Molekeln in der Volumeinheit und der mittleren kinetischen Energie einer Molekel ab. In der Nähe des Verflüssigungspunktes sind die Gasmolekeln nicht mehr sämtlich Einfachmolekeln, sondern zum Teil Vielfachmolekeln; also hat die Zahl der sich selbständig bewegenden Größen abgenommen, während sie in der Volumeinheit auf Grund des Avogadroschen Gesetzes dieselbe geblieben ist: es hat eben das Gesamtvolum abgenommen. Bezeichnet N die Anzahl der ursprünglich vorhandenen Gasmolekeln in Form von Einfachmolekeln, m die Anzahl der verschwundenen Einfachmolekeln, so hat man an Stelle von N jetzt $N - m$ Molekeln. Die kinetische Gesamtenergie ist bei der Aneinanderlagerung auf Grund parallel gerichteter Bewegungen dieselbe geblieben und hat sich nur auf weniger Träger verteilt; demnach hat sich die durchschnittliche kinetische Energie, die an einem Träger haftet, im Verhältnis $\frac{N}{N-m}$ gehoben. In demselben Verhältnis nimmt aber das Volum ab, so daß die Anzahl der den Druck erzeugenden Stöße in der Volumeinheit dieselbe wie vorher bleibt. Folglich wächst der Druck im Verhältnis $p \frac{N}{N-m} : p$: und man erhält die Gleichung: $p + C = p \frac{N}{N-m}$ und die Gasformel lautet: $p \frac{N}{N-m} (v - b) = RT$ oder $(v - b)\, p = \frac{N-m}{N} RT$. Diese Gleichung stellt eine gleichseitige Hyperbel dar, deren Hauptachse $\sqrt{\frac{N-m}{N}}$ mal so groß ist wie die der entsprechenden Hyperbel des Boyle-Gay-Lussaeschen Gesetzes. Der Faktor $\frac{N-m}{N}$ ist eine Funktion der Temperatur, da von dieser die Bildung der Vielfachmolekeln abhängig ist nach einem noch zu ermittelnden Gesetze, das vielleicht mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung aufgefunden werden kann. Die einzelnen Temperaturkurven auf Grund der Gleichung können sich nicht schneiden, da $\frac{N-m}{N}$ und T in demselben Sinne wachsen oder abnehmen; und zu jedem p und T gehört nur ein v, wie es, der Erfahrung entsprechend, auch sein muß. Die Größe C fällt bei dieser Betrachtung ganz fort. Man kann sie berechnen aus der Formel $v + C = p \frac{N}{N-m}$. Da m kurz vor der Verflüssigung noch klein gegen N ist, so ist angenähert $\frac{N}{N-m} = 1 + \frac{m}{N}$; demnach ist: $C = \frac{p\,m}{N}$.

94 Die Vorstellung, daß Wasser und Luft an ihrer Berührungsstelle im Energiegleichgewichte stehen, schließt nicht aus, daß an und in der Oberfläche des Wassers noch Veränderungen vor sich gehen, die mit dem Ener-

giegleichgewichte im Einklang stehen. Bringt man zwei Gase von gleicher Temperatur zusammen, so mischen sie sich im Laufe der Zeit völlig gleichmäßig durcheinander, ohne daß Arbeit verbraucht oder gewonnen wird, allein auf Grund der kinetischen Energie der Molekeln. Das gleiche ist bei der Berührung von Luft und Wasser zu erwarten: es tritt Wasserdampf in die Luft und Luft in das Wasser. Wenn wir nun von der Luft absehen, also annehmen, daß über dem Wasser nur Wasserdampf enthalten ist, so stoßen die Wasserdampfmolekeln dieses Raumes in das Wasser hinein; während aus diesem sich Einfachmolekeln H_2O ablösen und in den oberen Raum eindringen. Die Mengen hängen von den Mengen der Einfachmolekeln H_2O in der Volumeinheit oberhalb und unterhalb der Begrenzungsfläche ab. Nun ist Wasserdampf 1237 mal so leicht als Wasser oder 1 ccm Wasser enthält 1237 mal so viel Molekeln als 1 ccm Dampf. Wenn nun bei 0° nur 12 Prozent Einzelmolekeln und bei 100° nur 20 Prozent im Wasser enthalten sind, so werden in 1 ccm Wasser noch 155 bis 240 mal so viele Einzelmolekln vorkommen, als in 1 ccm wasserdampfgesättigten Raumes. Demnach muß der Ausgleich in dem Sinne vor sich gehen, daß an der Oberfläche mehr H_2O aus dem Wasser austreten als eintreten. Anderseits ist das Verhältnis der Einfach- und Vielfachmolekeln an die im Wasser herrschende Temperatur gebunden, so daß nicht beliebig viele H_2O austreten können. Demnach muß eine Übergangsschicht im Wasser an der Oberfläche entstehen, in welcher eine allmähliche Abnahme der Einzelmolekeln stattfindet von der Normalzahl im Innern bis zu der in der gegebenen Zeit außerhalb befindlichen Zahl. Diese Schicht wird tiefer oder weniger tief sein, je nachdem der Unterschied zwischen den beiden genannten Zahlen größer oder kleiner ist. Sie bildet sich von selbst, ohne daß das Energiegleichgewicht gestört wird. Die der Oberfläche nächsten Schichten werden daher verhältnismäßig sehr wenige Einzelmolekeln H_2O enthalten, also dem festen Zustande nahe kommen; die darunter liegenden werden immer weicher werden, bis in dem Abstande des Bruchteiles eines Millimeters von der Oberfläche der normale flüssige Zustand erreicht ist. Diese Übergangsschicht verursacht das, was man Oberflächenspannung genannt hat. Sie ist also auf die Vermehrung des festen Zustandes an der Oberfläche zurückzuführen und muß sich mit Wasserdampfgehalt und Temperatur ändern. Experimentaluntersuchungen hierüber sind erwünscht. Sie werden zeigen, inwieweit die gegebene Auffassung sich bewähren wird. Jedenfalls ist aber jetzt die Möglichkeit einer rein mechanischen Erklärung der Oberflächenspannung ohne Zuhilfenahme hypothetischer Kräfte gegeben.

Durch die Abgabe der Einzelmolekeln und das Eindringen der an ihre Stelle tretenden Vielfachmolekeln ist der Energiemangel der Oberfläche gesteigert worden im Vergleich zu dem des unter ihr liegenden Wassers. Die Schicht kann daher einer Einwirkung von außen einen größeren Widerstand entgegensetzen, da sie die Aufnahme einer größeren Energie gestattet, ohne zu zerreißen. So können Käfer auf ihr herumlaufen. Bedeutende Wirkungen werden an einer Oberfläche beobachtet, die aus einer Seifenlösung gebildet und infolge ihres Energiemangels von der Flüssigkeitsoberfläche abgelöst werden kann. In der Luft setzt sie die Verdunstung der Einzelmolekeln fort und zwar nach der anderen Seite, so daß der Prozentgehalt an Vielfachmolekeln steigt. Dadurch wächst die Festigkeit, die sie auf der Oberfläche der Seifenlösung und auch nach ihrer Ablösung hatte, noch weiter, demnach übersteigt der Energiemangel, der nun dem Zustande der Oberflächenhaut entspricht, den wirklich vorhandenen; d. h. in der Haut befindet sich freie Energie, die von ihr unter geeigneten Umständen abgegeben werden

kann. Ist die Haut eine geschlossene Kugeloberfläche, so wird sie die eingeschlossene Luft etwas zusammenpressen. Ist die Haut vertikal zwischen zwei horizontalen Stäbchen ausgespannt, so übt sie auf beide einen Zug aus; und wenn das untere Stäbchen leicht und beweglich ist, so wird es gehoben, bis durch die geleistete Arbeit der normale Energiemangel erreicht ist. Auch der berühmte Mensbrugghesche Versuch ist unschwer zu erklären, bei welchem auf eine im Rahmen eingespannte Seifenhaut eine leichte geschlossene Schlinge gelegt wird, die nach der Zerstörung der von ihr eingeschlossenen Seifenhaut sich zu einer Kreislinie auseinanderzieht. Die freie Energie in der erhalten bleibenden, die Schlinge umschließenden Seifenhaut, die ihrer Natur nach gleichmäßig verteilt ist, leistet Arbeit, indem sie den Faden der Schlinge auseinander zieht, und nimmt damit ab. Sie gestattet demnach eine ganz bestimmte Flächenabnahme der Seifenhaut und einen ebenso großen Zuwachs der von der Schlinge umschlossenen Fläche. Genügt dieser, die Schlinge zu einem vollen Kreis auseinanderzuziehen, so gelingt der Mensbrugghesche Versuch.

Es darf hier auch kurz darauf hingewiesen werden, daß die vorstehenden Darlegungen einen Weg bieten, den Ursprung der von Lenard zuerst beobachteten Wassertropfenfall-Elektrizität zu ermitteln. Zu vermuten ist, daß sie in einer freien Energie bei der Tropfenbildung entspringt; und die Untersuchung ist darauf zu richten, welcher der verschiedenen möglichen Vorgänge die freie Energie liefert.

95 Hier ist der Ort, aufzuklären, warum ein frei fallender Tropfen die Kugelgestalt annimmt. Während des Fallens wirken keine äußeren Einflüsse auf seine Gestalt ein. Die einzelnen Teilchen bewegen sich auf Grund der in ihnen enthaltenen Energie gegeneinander und durcheinander, aber sie sind in dieser Bewegung nicht frei, sondern durch einen bestimmten Energiemangel aneinander gebunden. Daher wird die Gestalt der Oberfläche durch diese nach allen Seiten gleichmäßig gerichteten Bewegungen der Einzelmolekeln und Molekelkomplexe bestimmt, aber außerdem durch die freie Energie dieser Oberfläche. Die ersteren Bewegungen werden die Gestalt einer überall konvexen Oberfläche begünstigen. Denn eine freischwebende Flüssigkeit wird immer bestrebt sein, eine Ecke zu vermeiden. Zeigt sich nämlich eine solche Ecke, so bewegen sich von der breiteren Basis der Ecke nach der Spitze zu mehr Molekeln und Molekelkomplexe als in entgegengesetzter Richtung und auch mehr als aus einer Schicht parallel der Flüssigkeitswand nach dieser hin. Durch diesen Vorgang wird die Spitze der Ecke mehr und mehr abgestumpft und dadurch der Oberfläche eine überall konvexe Gestalt verliehen. Die freie Energie der Oberfläche, die, ähnlich wie bei der Seifenblase, bestrebt ist, das Volum des Tropfens zu verkleinern, verteilt sich auf ihr überall gleichmäßig und sorgt dadurch dafür, daß die konvexe Oberfläche in eine Kugel übergeht.

Wenn nun niederfallende Tropfen beim Aufprallen auf der Unterlage die Gestalt ändern, so darf man annehmen, daß sie diese Deformation erst aus der Kugelgestalt heraus annehmen. Dies ist auch bei Hg, Oel, bei allen nicht adhärierenden Flüssigkeiten der Fall; doch scheint es sich bei den adhärierenden Flüssigkeiten anders zu verhalten, indem die Oberfläche die konkave Gestalt annimmt. Aber auch diese weisen die konvexe Form auf, wenn auch nur unter gewissen Bedingungen, so daß die Entscheidung, ob die eine oder andere Oberflächengestalt eintritt, von den begleitenden Umständen abhängt. Nimmt man eine zweimal rechtwinklig gebogene Glasröhre mit verschieden langen Schenkeln und füllt Wasser in dieselbe, so bildet sich in beiden Schenkeln in gleicher Höhe ein konkaver Meniskus. Durch

Zugießen von Wasser kann man die Flüssigkeit bis zum oberen Ende des kürzeren Schenkels emporheben, wobei die konkave Oberfläche auf beiden Seiten bleibt. Durch weiteres Zugießen im längeren Schenkel steigt die Flüssigkeit im kürzeren Schenkel nicht weiter, fließt aber auch nicht aus, wie man vermuten könnte; sondern die Krümmung des hohlen Meniskes nimmt ab, bis sie bei einem gewissen Überdruck gleich Null geworden ist, während im längeren Schenkel der hohle Meniskus bleibt. Durch weiteres Zugießen wölbt sich im kürzeren Schenkel die Flüssigkeitsoberfläche nach außen; die Krümmung wird immer stärker, bis sie die frühere Stärke des hohlen Meniskus erreicht. Eine weitere Zufuhr von Wasser macht den Überdruck so groß, daß die Oberflächenhaut im kürzeren Schenkel zerreißt.

Das unterschiedliche Verhalten des Wassers in beiden Schenkeln muß auf die Verschiedenheit der Zustände in ihnen zurückgeführt werden; nun ist aber der einzige Unterschied der, daß im kürzeren Schenkel das Wasser am Ende der Röhre steht, daß es also nur unter sich eine Glaswand hat, während im längeren Schenkel oberhalb und unterhalb der Oberflächenhaut sich eine Glaswand befindet. Das Fehlen der Glaswand nach der einen Richtung ermöglicht demnach die konvexe Oberfläche, das Vorhandensein sowohl oberhalb wie unterhalb die konkave. Man darf daher versuchen, auf diesen Umstand die Erklärung des verschiedenen Verhaltens zu stützen. Dazu bedarf es aber erst der Beantwortung der Frage, was unter Adhäsion zu verstehen ist.

96 Diese ist immer als nahe verwandt mit der Kohäsion angesehen worden. Während die letztere das Aneinanderhaften der kleinsten Teile desselben Stoffes ist, ist die erstere das Aneinanderhaften von festen und flüssigen Massen verschiedener Stoffe oder auch von festen und gasigen Stoffen, z. B. das Anhaften von H an Platin und Palladium, wobei jedoch der Wasserstoff auf der Metalloberfläche unter Wärmeabgabe sich verdichtet und demnach zu einer Flüssigkeit wird. Nun ist noch der zweite wichtige Umstand hervorzuheben, daß alle Stoffe im festen und flüssigen Zustande Kohäsion aufweisen, während die Adhäsion zwischen verschiedenen Stoffen bald eintritt, bald ausbleibt. — Das Aneinanderhaften der kleinsten Teile eines festen Stoffes für sich wie auch eines flüssigen für sich ist auf einen Energiemangel zurückzuführen; es bleibt daher nur zu erklären übrig, weshalb die Oberflächenschichten zwischen zwei verschiedenen Stoffen in dem einen Falle gleichfalls aneinander haften, in dem anderen nicht. Der Grund kann nur in dem Verhalten der kleinsten Teile der verschiedenen Stoffe zueinander gesucht werden. Da diese sich aber nur in ihren Bewegungen, ihren Wärmeschwingungen unterscheiden, so wird man in deren Form den Grund finden müssen. Liegen zwei Atome bzw. Molekeln verschiedener Stoffe unmittelbar aneinander an und machen genau gleiche Schwingungen hin und zurück in derselben Zeit, so wird der Zusammenhang bestehen bleiben, so lange nicht eine von außen hinzutretende Einwirkung ihn aufhebt. Es lagert sich dann eine Schicht des flüssigen Körpers auf dem festen ab und bleibt darauf haften. Sind beide Körper flüssig, so mischen sich die Flüssigkeiten zu einer Lösung. Es kann auch mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß zwei Stoffe, bei denen die Schwingungszeiten nicht gleich sind, aber in einem rationalen Verhältnisse zueinander stehen, noch Adhäsion zeigen. Denn wenn auch nach sehr kleiner Zeit der Zusammenhang der kleinsten Teile zufolge der entgegengesetzten Richtung der Bewegung gelockert wird, wird er nach derselben kurzen Zeit zurückgebildet, so daß er schon wieder erreicht ist, ehe eine Trennung stattgefunden hat. Wenn aber die Schwingungen bei der gegebenen Temperatur nicht gleich oder harmonisch, sondern zueinander irrational,

also anharmonisch sind, so muß ein zufälliger Zusammenhang sofort wieder aufgelöst werden; es kann sich demnach keine Adhäsion bilden.

Die meisten Untersuchungen über Adhäsion sind einerseits zwischen Glas und Quecksilber und anderseits zwischen Glas und Wasser oder wässrigen Lösungen gemacht worden. Glas ist als eine sehr zähe Flüssigkeit zu betrachten, deren Molekeln noch nicht die kristallinische Lagerung wie in einem Salze angenommen haben. Sie bzw. die sie zusammensetzenden Atome haben Schwingungsbewegungen, deren Ebenen die verschiedensten Lagen einnehmen; und ihre Bewegungen stimmen mit denen einer gewöhnlichen Flüssigkeit in der Verschiedenheit der Form und der Lage im allgemeinen überein, nur mit dem Unterschiede, daß der Ort wie auch die allgemeine Richtung und Form der Bewegung der einzelnen Molekel im Glase dieselbe bleibt, während die Molekeln bzw. ihre Ionen in der Flüssigkeit infolge ihrer — wenn auch nur beschränkt — freien Beweglichkeit jeden beliebigen Ort und jede beliebige Bewegungsebene im Laufe der Zeit einnehmen. An der Glasoberfläche wird man daher alle verschiedenen möglichen Richtungen und Formen der Schwingungen antreffen. Im Wasser und seinen Lösungen ist dasselbe der Fall. Daher werden auch in jedem Augenblicke sehr viele Teile des Glases und unmittelbar benachbarte Teile des Wassers gleichgerichtete Schwingungen haben, so daß diese Molekeln im Zusammenhange bleiben. Dieser Zusammenhang wird zwar an vielen Stellen jeden Augenblick gelöst, um an anderen Stellen neu gebildet zu werden. Aber er wird an der Glaswand leichter erhalten bleiben, weil auf die adhärierenden Molekeln (Wasser und Glas) nur von einer Seite, der Wasserseite, Stöße ausgeübt werden, während inmitten der Flüssigkeit von beiden Seiten die trennenden Stöße erfolgen. Das heißt aber: die Adhäsion des Wassers an Glas ist größer als die Kohäsion des Wassers. Diese bekannte Tatsache findet hier eine Erklärung, die von hypothetischen Kräften gänzlich absieht.

Nun könnte man folgern, daß dann die Adhäsion des Hg an Glas gleichfalls größer sein müsse als der Zusammenhalt der Hg-Teile zueinander. Aber dieser Schluß hat keine zwingende Kraft, wenn die Schwingungen der Metallatome anharmonisch sind zu denen der Nichtmetalle. Dann kann nämlich das Überwiegen der letzteren über die ersteren in einer festen chemischen Verbindung ein dauerndes Zusammenhaften mit den Hg-Teilen unmöglich machen, während die letzteren bei freier Beweglichkeit sich auf Grund des Energiemangels immer wieder zusammenballen müssen. Eine Berechnung, die von der Zusammensetzung des deutschen Glases ausgeht und von der Annahme, daß im Quecksilber das Verhältnis der Vielfachmolekeln zu den Einfachmolekeln dasselbe wie im Wasser ist, zeigt, daß neben einem Metallatom des Glases zehn Metalloidatome schwingen und daß dieser Gesamtheit gegenüber annähernd nur ein flüssiges Hg-Teilchen schwingt, so daß die anharmonischen Schwingungen dieser Metalloidatome des Glases auf die Quecksilberteilchen einen überwiegenden Einfluß ausüben und ein Anhaften von dauerndem Bestande nicht gestatten.*) Beim Queck-

---

*) Die Zusammensetzung des deutschen Glases wird durch die Formeln ($5\,Na_2O$, $6\,CaO$, $33\,SiO_2$, Na_2O, CaO, $6\,SiO_2$ und $5\,Na_2O$, $7\,CaO$, $36\,SiO_2$) bestimmt; es kommt also auf 10 Metalloidatome immer 1 zweiwertiges Metallatom. Das spezifische Gewicht des Glases ist 2,4, das Molekulargewicht 239, wenn das mittlere Gewicht von Na_2 und Ca mit 43 in Rechnung gezogen wird; dann ist das Molekularvolumen $= 2{,}4 : 239 = 0{,}01$. Das Atomvolum des Quecksilbers ist $13{,}6 : 200{,}6 = 0{,}068$. Sind aber die einzelnen Teilchen flüssigen Quecksilbers nicht Atome, sondern Atomkomplexe wie beim Wasser Molekelkomplexe und zwar in demselben Verhältnisse, so bilden bei 0^{0} C 100 Hg-Atome 13 Atom-

silber ist daher eine Adhäsion an Glas nicht zu erwarten, während die Kohäsion seiner Teile bedeutend ist. Wohl mag aber hierdurch die leichte Adhäsion verständlich gemacht werden, die man aus dem Auflegen von Gewichten auf der einen Wagschale einer im Gleichgewicht befindlichen Wage erschließt, die bewirken, daß eine an der anderen Wagschale befestigte, auf Quecksilber ruhende Glasplatte von diesem abgehoben wird.

97 Kommen wir nun auf die Frage zurück, was den Meniskus des Wassers bald konkav, bald konvex macht, so erkennen wir, daß mit dem Fehlen der Glaswand auch ein Fehlen von harmonischen Schwingungen einhergeht, daß es also ebenso wirkt wie das Vorhandensein von anharmonischen Schwingungen. Nun ist aber in dem Vorhandensein harmonischer oder nichtharmonischer Schwingungen nicht der erste Anlaß zur Gestaltung der Oberfläche gegeben, sondern nur die Entscheidung, ob sie hohl oder erhaben ist. Der eigentliche Anlaß beruht in der Tatsache, daß die horizontale Fläche der Flüssigkeit mit der vertikalen Glaswand einen rechten Winkel, also eine Ecke bildet. Die Beseitigung der Ecke führt aber, wie vorher dargelegt ist, zur Bildung einer Kugeloberfläche. Dann muß der Randwinkel zwischen Oberfläche und Seitenwand gleich Null sein, wie er auch wirklich beobachtet wird; und falls eine Abweichung hiervon beobachtet wird, so ist diese dem Einfluß der Gravitation zuzuschreiben. Die konkave Oberfläche des Wassers ist nun so zu verstehen: unterhalb der Oberfläche liegen die H_2O-Molekeln durch Adhäsion fest. Die Oberflächenmolekeln finden daher diese Stellen bei ihren Bewegungen schon besetzt; sie können wohl durch Verdrängung anderer Molekeln an die Wand kommen, aber dadurch wird der Zustand der Wasserschicht nicht geändert. Dagegen stoßen die nach oben schwingenden Molekeln des Wassers in der unmittelbaren Nähe der Glaswand zum Teil auf Molekeln dieser Glaswand mit gleichgerichteten harmonischen Schwingungen und haften dadurch an der Wand. Infolgedessen wird die vorhandene Randecke abgestumpft. Dies geht so lange vor sich, bis die Ecke beseitigt, also überall dieselbe Krümmung erzielt ist, natürlich nur so weit, als die Gravitation es gestattet. Der entstandene Meniskus ist konkav. Beim Quecksilber benetzen die kleinsten Teilchen die Glaswand nicht infolge der anharmonischen Schwingungen zwischen beiden; aber die Gravitation preßt durch Seitendruck das Quecksilber an das Glas. Am Rande schwingen die Quecksilberteilchen nach allen Richtungen; nach unten stoßen sie auf andere Teilchen gleicher Art; nach oben fehlt ihnen die Gelegenheit dazu, sich anzulagern; demnach ist nur die Möglichkeit zur Bildung einer konvexen Oberfläche gegeben.

98 Nun bleibt noch übrig, die verschiedene Höhe der Flüssigkeit im engeren und weiteren Gefäße zu erklären, und weshalb in einer vertikal gehaltenen engen Röhre eine Wassersäule haftet, deren Höhe das Doppelte von der Höhendifferenz im engeren und weiteren Gefäße ist.

Diese Erscheinungen sind auf den Einfluß der Gravitation zurückzuführen, also auf eine von außen hinzutretende Energie. Wie auch die Gravitation aufgefaßt werden mag, sie wirkt wie ein vertikaler Stoß von oben nach unten, also wie eine Energie, die auf den getroffenen Körper übertritt.

---

komplexe; dann ist das mittlere Atomkomplexgewicht $\frac{200{,}6 \cdot 100}{13}$ und das Atomkomplexvolumen $= \frac{13{,}6 \cdot 13}{200{,}6 \cdot 100} = 0{,}088$. Der Quotient dieses Volums zu dem des Glases ist $= 0{,}88$. Daher wird das Verhältnis der an der Glaswand einander gegenüberliegenden Flächen einer Hg-Partikel zu einer Glaspartikel, die ein 2wertiges Element enthält $= \sqrt[3]{88^2} = 0{,}92$ sein. Demnach stehen 92 Hg-Partikel 100 Glasmolekeln gegenüber, also annähernd jeder Hg-Partikel 1 Glasmolekel.

In zwei miteinander verbundenen Röhren muß die Flüssigkeit gleich hoch stehen, da sonst die höherstehende freie Energie besäße, die auf die andere solange übertreten würde, bis mit der gleichen Höhe wieder Energiegleichgewicht erzielt würde.

Trifft der Gravitationsstoß die konkave Oberflächenhaut des Wassers in einer vertikalen Röhre, so bewirkt er eine Auseinanderzerrung der Molekeln der Oberfläche, da er diese zu vergrößern sucht. Der dazu erforderliche Energiezuwachs der Oberfläche muß aus der Gravitationsenergie bestritten werden, so daß sie ihre eigentliche Aufgabe nur in vermindertem Umfange erfüllen kann. Solange sich ein Wasserfaden durch die vertikale Röhre hinab bewegt, ist auch die untere Oberflächenhaut konkav, die Öffnung der Höhle liegt aber nach unten. Die Gravitationsenergie sucht diese Haut zusammenzupressen, nähert daher deren Molekeln, so daß bisher gebundene Energie frei wird. Diese erteilt dadurch der Gravitationsenergie einen Zuwachs, der mit der Abgabe an der oberen Fläche als gleich anzusehen ist, so daß der Wasserfaden, wenn man von den Wirkungen der Reibung in der Röhre absieht, den Gesetzen des freifallenden Tropfens folgt. Beim Quecksilber, welches in einer vertikalen Röhre hängt, muß die Gravitationsenergie an der oberen konvexen Oberfläche eine gebundene Oberflächenenergie freimachen, an der unteren freie binden, so daß auch hier die Wirkungen der Oberflächenhäute sich kompensieren.

Anders verhält es sich, wenn die Wassersäule mit oberer konkaver Oberfläche sich bis zum unteren Ende der vertikalen Röhre erstreckt und dort mit einer konvexen Oberfläche abschließt. Dann zerrt die Gravitationsenergie beide Oberflächen auseinander, wird also an beiden geschwächt, so daß sie die volle Beschleunigung des freien Falls nicht mehr leisten kann. Wir haben es, sozusagen, mit einer Art Atwoodscher Fallmaschine zu tun. Wie dort das Übergewicht sich und die beiden gleichen großen widerstrebenden Gewichte fortbewegen muß, muß hier die Gravitationsenergie die Wassersäule bewegen und gleichzeitig die Widerstände der beiden Oberflächenhäute überwinden. Die Wassersäule kann nun durch Ausfließen so klein werden, daß ihre Gravitationsenergie die von den beiden Oberflächen aufgenommene Flächenenergie nicht mehr überragt; dann muß die Wassersäule in der vertikalen Röhre hängen bleiben. Damit sind im wesentlichen die Kapillaritätserscheinungen erklärt. Es soll aber mit dieser Erklärung nicht gesagt sein, daß das Gewicht der Röhre mit der Wassermasse um so viel kleiner geworden ist, vielmehr dürfen wir annehmen, daß die beiden Oberflächen den von ihnen aufgenommenen Gravitationsstoß auf die feste Glaswand übertragen haben; aber die Flüssigkeit schwebt in der Röhre.

Die Höhe der Flüssigkeit ist dieselbe wie die Niveaudifferenz bei dem vorhin erwähnten Versuch, in dem im kürzeren Schenkel der verbundenen Röhren die Flüssigkeit mit einer konvexen Oberfläche schließt, die durch den Überdruck des Wassers im längeren Schenkel erzeugt wird. Hier erhält die Gravitationsenergie im kürzeren Schenkel durch die freigewordene Oberflächenenergie einen Zuwachs, im längeren eine Abnahme, so daß die freischwebende Flüssigkeitssäule im längeren Schenkel das Energiegleichgewicht herstellt. Und wenn im kürzeren Schenkel eine ebene Oberfläche erzielt wird, so ist an dieser Stelle weder Abgabe noch Aufnahme von Oberflächenenergie möglich; demnach braucht die Abnahme der Gravitationsenergie im längeren Schenkel nur durch eine halb so große Flüssigkeitssäule ausgeglichen werden.

Wenn zwei kommunizierende Röhren verschieden große Querschnitte haben, so steht in der engeren das Wasser höher, das Quecksilber tiefer als in der weiteren. Wir sehen als einzigen Unterschied die verschiedenen Krüm-

mungen der Oberfläche, die sich im engeren Gefäße der Kugel, im weiteren der der Ebene nähert. Nun ist anzunehmen, daß die Stärke der Auseinanderzerrung der krummen Wasseroberfläche durch die Gravitationsenergie und damit der Aufwand dieser Energie bei gleicher Krümmung überall dieselbe ist und daß demnach dieser Aufwand, auf die Flächeneinheit des horizontalen Querschnittes berechnet, von der Mitte der Röhre nach dem Rande zunimmt; dann muß auch der mittlere Energieaufwand für diese Flächeneinheit in der engeren Röhre in jedem Augenblick größer sein als in der weiteren, da ja auch das Verhältnis der ganzen Wasseroberfläche zum horizontalen Querschnitt der Röhre größer ist. Dann bleibt für die eigentliche Gravitationswirkung im engeren Gefäße weniger Energie übrig als in dem weiteren, so daß ein Überdruck von dem letzteren nach dem ersteren entsteht, der das Wasser in der engeren Röhre über das Niveau in der weiteren erhebt. Wenn dagegen beim Quecksilber die Zusammenpressung der konvexen Oberfläche Energie freimacht und um so mehr, je gekrümmter die Oberfläche ist, so wird in der engeren Röhre ein größerer Überschuß über die eigentliche Gravitationsenergie vorhanden sein als in der weiteren; daher wird das Quecksilber aus der engeren in die weitere Röhre gedrückt werden, bis das Energiegleichgewicht wieder erreicht ist.

99 Damit sind die wichtigsten potentiellen Energien besprochen bis auf die Gravitation. Deren Nachweis als kinetische Energie ergibt sich als das Ergebnis einer ganzen anderen Gedankenkette, so daß er erst im nächsten Abschnitt geführt werden kann. Aber das Ergebnis der heutigen Betrachtungen geht schon darauf hinaus, daß die potentiellen Energien entweder als kinetisch erfaßt werden können oder ihrem wahren Wesen nach in einem Energiemangel bestehen. Man darf daher die Erwartung aussprechen, daß auch jede neue potentielle Energie, die noch gefunden wird, als kinetisch oder als Energiemangel gedeutet wird. Dann wird man aber unwillkürlich zu dem Axiom gedrängt, daß es nur kinetische Energien gibt. Zugleich mag bemerkt werden, daß auch der Kraftbegriff geklärt wird. Bisher wurden Muskelkraft und Kohäsionskraft beide als Kraft bezeichnet: aber die erstere ist etwas, das Arbeit leistet, die letztere etwas, was keine Arbeit leistet, zu dessen Überwindung vielmehr Arbeit aufgewendet wird. Die erstere ist eine Energie, die zweite ein Energiemangel. Nur die erstere darf als Kraft bezeichnet werden und Kraft und Energie fallen begrifflich zusammen. Im gewöhnlichen Leben ist Kraft die Energie, die bei der Überwindung des Widerstandes längs der Wegeinheit aufgewandt wird, so daß die Energie selbst das Produkt aus dieser Kraft und der Maßzahl des Weges ist. Die in der Mechanik gebrauchte Größe Kraft als Produkt aus Masse und Beschleunigung ist eine Abstraktion, eine Fiktion ohne physikalische Bedeutung. Die Energievorstellung wird nun eine ganz einheitliche: es ist die Wucht, die in jedem, in Bewegung befindlichen Körper steckt; und die Forscher, die den deutschen Namen Wucht eingeführt haben, sind auf der richtigen Spur gewesen. Die bisher als Kennzeichen der Energie ausgesprochene Arbeitsfähigkeit braucht nicht mehr als eines ihrer Bestimmungsstücke herangezogen zu werden, ja, sie darf es gar nicht, da es einen Fall geben muß, in dem die Energie keine Arbeit leisten kann, wenn nämlich das Energiegleichgewicht hergestellt ist; denn sie kann nur einen Widerstand überwinden, der kleiner als sie ist. Die Arbeitsleistung setzt also die Beziehung zu einer anderen Energie voraus, kann also nicht benutzt werden, um das Wesen der Energie zu erklären. Gleichzeitig ergibt sich, daß eine Energie nur soweit Arbeit leisten kann, als sie noch in einem Überschuß auf einem Träger vorhanden ist. Diese überschüssige Energie nenne ich freie Energie, während der Rest,

der durch die Energie der Nachbarträger im Schach gehalten wird, als gebunden bezeichnet werden muß.

Daran schließt sich die Frage, ob das Überfließen der Energie von einem Träger zum anderen notwendig eine Arbeit mit sich bringt. Das hängt davon ab, was man unter Arbeit versteht. Versteht man darunter die Überwindung eines Widerstandes längs eines bestimmten Weges, so muß auch ein solcher Widerstand vorhanden sein. Steht einem Träger mit großer Energie ein fester Körper gegenüber, so bewirkt das Übertreten der Energie auf ihn zunächst nur eine Verminderung des Energiemangels; und damit wird keine Arbeit geleistet. Ein gespannter Bogen leistet erst Arbeit, wenn der Pfeil abgeschossen wird. Wird dagegen unter Arbeit jede Zustandsänderung der Körper bei Verlagerung der Energie verstanden, dann ist Arbeit und Verlagerung dasselbe: und jede freie Energie leistet dann Arbeit; und die Verlagerung ist das sichtbare Zeichen für sie. Dann muß die Menge der freien Energie der Welt immer kleiner werden und die Entwicklung einem bestimmten Ziele, dem allgemeinen Energiegleichgewicht, zustreben. Dieses wird aber notwendigerweise nur dann erreicht werden, wenn 1. jede freie Energie in gebundene übergehen muß und 2. keine gebundene Energie jemals frei werden kann.

100 Was den ersten Punkt anlangt, so gibt es drei verschiedene Arten von mit Energie behafteten Trägern, deren freie Energie nicht in gebundene übergeht. Diese sind die Flüssigkeiten, die Gase und die Elektronen. Die einzelne Gasmolekel hat wechselnde Geschwindigkeiten; sie nimmt bald Energie auf; bald gibt sie solche ab vermöge der Zusammenstöße untereinander, während die Gesamtsumme der Energie unverändert bleibt. Die Molekeln bilden in ihrer Gesamtheit ein perpetuum mobile dritter Art. Das gleiche gilt von den Flüssigkeiten, insofern sie eine Mischung aus Gasen und festen Körpern sind. Da aber alle Flüssigkeiten zu festen Körpern werden bei Temperaturen, die im Weltraume unterschritten werden, so müssen sie dort erstarren. Schon zweifelhaft ist es, ob der Weltraum eine Temperatur besitzt, bei welcher auch jedes Gas fest werden muß. Ist das nicht der Fall, so ist auch nicht sicher, daß der Zustand des Energiegleichgewichts aller Molekeln erzielt wird. Und in bezug auf die Elektronen, die den Weltraum mit Lichtgeschwindigkeit durcheilen, ist darüber mit noch größerer Unsicherheit zu urteilen. Es ist daher wohl denkbar, daß aus diesem Grunde das erwähnte Energiegleichgewicht auch in unendlicher Zeit nicht erreicht werden kann.

Was den zweiten Punkt betrifft, so gibt es sicher wenigstens einen Fall, indem gebundene Energie in freie übergeht. Dies ist der Zusammenstoß bewegter Massen miteinander. Solange eine Kanonenkugel frei im Raume fliegt, ist die in ihr steckende Energie, fortschreitende wie drehende, gebunden, indem ein Überfließen von einem Träger zum andern nicht möglich ist. Stößt sie aber auf einen Widerstand, so wird die lebendige Kraft in Schwingungswucht, ganz oder teilweise, umgewandelt, die im Vergleich zu der Energie der Nachbarträger im Überschuß vorhanden, also in diesem überschießenden Teile frei ist. Hier ist also gebundene Energie in freie übergegangen. Solcher gebundener Energie gibt es im Weltall eine ungeheure Menge, so daß man durch den Zusammenstoß von Weltkörpern die Umwandlung von gebundener in freie Energie häufig erwarten kann. Ja, die Ergänzung der von der Sonne abgegebenen freien Energie hat man auf den Zufluß der in den Meteoren steckenden gebundenen Energie zurückführen wollen. Der Zusammenstoß zweier großen Weltkörper kann eine so große Energie freimachen, daß der feste und flüssige Aggregatzustand durch Auffüllung von Energie in den gasförmigen übergeht und daß derselbe Zustand

wieder eintritt, den Kant bei seiner Entstehung des Sonnensystems als gegeben voraussetzt. Daß in dieser Gasmenge alle Energie gleichmäßig verteilt sein sollte, ist, als höchst unwahrscheinlich, nicht anzunehmen; denn abgesehen von der Natur des Gaszustandes werden die, den Zusammenstoß zunächst auffangenden Massen die größte Energie aufnehmen und am dichtesten zusammenbleiben; hier werden sich also auch am ehesten gepaarte Atome bilden, die zu Molekeln zusammenlagern und dadurch die Ungleichheit vergrößern, die dann schließlich die Rückbildung zu einer neuen Welt bewirkt. Man könnte nun schließen, daß im Laufe einer unendlichen Zeit eine einzige Zentralsonne gebildet würde, auf welcher dann alle freie Energie in gebundene überginge. Doch ist es durchaus nicht notwendig, daß aus der gebildeten Nebelmasse zweier Welten ein einziges neues Sonnensystem hervorgeht. Es können auch zwei oder mehrere sein; ja zwei werden um so eher zu erwarten sein, als sich die Massen nach dem Zusammenstoß wesentlich nach zwei verschiedenen Hauptrichtungen fortbewegen werden.

Diese ganze Betrachtung würde allerdings gegenstandslos sein, wenn man nachweisen könnte, daß ein Zusammenstoß zweier Sonnensysteme unmöglich wäre. Daß Teile desselben Sonnensystems, also z. B. unsere Planeten untereinander oder mit der Sonne dem Schicksal des Zusammenstoßes nicht verfallen können, darf wohl auf Grund der in ihnen steckenden Energie, die ihre Bahnen bestimmt, angenommen werden. Sie sind auch auf Grund desselben Werdeganges entstanden. Daß aber zwei verschiedene Sonnen nicht zum Zusamenstoß kommen können, würde sich nur durch den Nachweis wahrscheinlich machen lassen, daß zwischen ihrer Bildung ein ursächlicher Zusammenhang bestanden hätte, der den Zusammenstoß ausschlösse. Aus allem ergibt sich, daß einerseits die Zusammenstöße nicht unmöglich sind und daß anderseits mit einer Zentralsonne nicht gerechnet werden muß. Dann werden in der unbegrenzten Zeit Welten entstehen und vergehen können im zeitlichen Verlauf. Unter dieser Annahme zerfällt die Schwierigkeit für die Vorstellung des Endlichen im Unendlichen. Dann ist jede Welt endlich; es folgen aber aufeinander unendlich viele Welten. Die Gesamtsumme der Weltenergie ist eine unveränderliche Größe; aber ihre Umlagerung geht nach zwei verschiedenen Richtungen; einmal wächst die gebundene, zu einer anderen Zeit die freie Energie; und bei einem bestimmten Zustand der Welt hat man zu untersuchen, in welcher Richtung der Prozeß verläuft. Auf der Erde vermindert sich die freie Energie. Dies hängt damit zusammen, daß einerseits die mit Energiemangel behafteten Stoffe die zugeführte Energie der Sonne aufnehmen und in gebundene überführen und anderseits die Erde mehr Energie nach außen abgibt als sie zur Zeit empfängt. Dann werden Organismen, wie wir Menschen, deren Bestehen an das Vorhandensein fester und flüssiger Stoffe geknüpft ist, durch ihre Beobachtungen nur eine Verminderung der freien Energie als Ergebnis der augenblicklichen Verlagerung feststellen. Wenn mit dem Zusammenstoß unseres Sonnensystems mit einem anderen die Vermehrung freier Energie beginnt, dann fehlt die Zeit und die Muße, in dieser Richtung Beobachtungen anzustellen; auch kann das Ergebnis bei diesem Weltuntergang nicht überliefert werden. Man kann nun nicht das allgemeine Urteil über die Richtung des Weltgeschehens durch Versuche feststellen, die an einem Orte nur zu einer Zeit gemacht werden können, in der eine bestimmte Richtung desselben herrscht. Daher sind alle zu diesem Zwecke auf der Erde gemachten Versuche wertlos.

Clausius hat geglaubt, als zweiten Hauptwärmesatz den Grundsatz aussprechen zu dürfen, daß die gebundene Energie des Weltraumes einem Maximum zustrebe. Diesen zweiten Hauptsatz hat man mit dem größten Aufwand

von Scharfsinn zu beweisen versucht, aber meines Erachtens ohne Erfolg. Selbst die sorgfältige Beweisführung M. Plancks in seiner Thermodynamik hat mich nicht überzeugen können und kann es auch nicht, wenn meine vorstehenden Erwägungen richtig sind. Die Bedeutung seiner Darlegungen liegt daher für mich nicht so sehr in dem Ergebnis seiner Beweisführung, als in der richtigen Problemstellung.

Das Bemühen, den zweiten Hauptsatz zu beweisen, entspringt unserem Erkenntnisbedürfnis. Der erste Satz über die Energie, daß das Energiekapital der Welt unveränderlich ist, und daß die Energie nur umgelagert werden kann, schließt die Neuschöpfung von Energie aus, läßt aber die Art der Umlagerung völlig unbeschränkt, also auch den Übergang von freier Energie in gebundene und umgekehrt. Der zweite Satz beschränkt zwar auch im allgemeinen die Art der Umlagerung nicht, fordert aber als Endergebnis jeder Umlagerung, daß die freie Energie ständig abnimmt, ohne diese Abnahme aus dem Wesen der Energie erklären zu können. Es müßte Zunahme wie Abnahme freier Energie möglich sein. Meine Auffassung läßt dies auch als möglich zu und erklärt gleichzeitig, weshalb zurzeit — wenigstens auf unserem Beobachtungsort, der Erde, die freie Energie abnimmt. Sie kommt daher der Forderung unseres Geistes nach dem zureichenden Grunde für eine tatsächliche Erscheinung in befriedigender Weise entgegen.

101 Die Erkenntnis, daß es keine potentiellen Energien, sondern nur kinetische gibt, vereinfacht unsere Grundvorstellungen von den Ursachen alles Geschehens, indem sie alle Veränderungen in der Natur auf die Umlagerung von Bewegungswucht zurückführt. Sie fördert dadurch das Verständnis der Natur und gibt den Weg an, auf dem die Erklärung einer Erscheinung zu suchen ist. Jede Erklärung muß die Quelle der freien Energie darlegen, die die Erscheinung veranlaßt. Man darf überhaupt nicht von Kräften im alten Sinne, die nur Abstraktionen sind, sondern muß von Energien ausgehen. Kräfte, deren Produkt eine Energie ergeben sollen, sind von Anfang an auszuschließen. Sie haben am meisten dazu beigetragen, die Entwicklung der allgemeinen Wissenschaft zu hemmen. In Zukunft wird es erschwert sein, eine der Kritik standhaltende Erklärung aufzustellen, da niemand mehr die Zuflucht zu irgend welchen inneren Kräften, deren Energiequelle er nicht nachweisen kann, nehmen darf; aber ebenso wird es auch erschwert sein, daß sich eine ungenügende Erklärung länger hält, da sie als solche schneller erkannt wird. Eine befriedigende Erklärung wird dagegen um so anschaulicher und folglich um so leichter verständlich und beurteilbar sein. Nach meiner Überzeugung würde das v. d. W.sche Gesetz gar nicht aufgestellt worden sein, wenn man damals eine potentielle Energie als nicht möglich angesehen hätte; und ebenso würden die elektrischen Elementarquanten nicht die beherrschende Rolle in der Wissenschaft der letzten 40 Jahre gespielt haben. Auch der in letzter Zeit geprägte Satz, daß eine Energie eine andere anzieht, daß also zwischen ihnen wie zwischen den Kräften Fernwirkungen stattfinden, kann keinen Bestand haben, da diese Anziehung eine Arbeit leisten, also eine Neuschaffung von Energie bedeuten würde.

Bei diesen großen Nachteilen, die der Begriff der potentiellen Energie uns gebracht hat, ist ihm daneben ein unvergängliches Verdienst zuzuschreiben: er hat dem Gesetz von der Erhaltung der Energie zur schnellen Anerkennung mit verholfen. Der Widerstand gegen die neue Lehre ging im wesentlichen, wie bei jedem Fortschritt, von den bejahrten Forschern aus, die sich von den gewohnten Vorstellungen nicht freimachen konnten. Der Sieg wurde von den jüngeren Kräften erfochten. Für sie war es eine befremdende

Erscheinung, daß Energie z. B. beim Biegen eines elastischen Stabes verschwand und nachher als Schleuderwirkung wieder sichtbar wurde, und zwar in derselben Größe, wie sie verschwunden war. Dies erinnerte an Zauberkraft. Da machte der Begriff der potentiellen Energie den jungen Gelehrten die Sache mundgerecht. Er wurde begierig aufgenommen, weil er schwere Bedenken gegen die neue allgemeine Wahrheit beseitigte. Aber was die Wissenschaft in der Mitte des vorigen Jahrhunderts wesentlich förderte, hat die folgenden Generationen schwer belastet. Es scheint das Schicksal jeder neuen Wahrheit zu sein, daß sie nicht rein, sondern mit den Eierschalen ihrer Entstehung behaftet, ins Leben tritt oder, anders ausgedrückt, daß sie auf einen Stab gestützt auftreten muß, der in der alten falschen Anschauung gewachsen ist, und daß sie erst ganz auf eigenen Füßen steht, wenn dieser Stab aus Altersschwäche gebrochen oder durch einen kühnen Angriff zersplittert ist. Jede neue Erkenntnis erfaßt noch nicht gleich den ganzen Umkreis ihres Anwendungsgebiets und verirrt sich daneben leicht auf Gebiete, wohin sie nicht gehört. Daher haftet ihr immer etwas Dogmatisches an. Dann ist es Aufgabe der Wissenschaft, das Dogmatische wieder auszuscheiden und dadurch die Erkenntnis zu klären und zu vertiefen. Dieses Dogmatische ist kenntlich an dem wesentlich Negativen seines Inhalts, während die wahre Erkenntnis positiv und anschaulich ist. Der Begriff der potentiellen Energie ist nichts als die Negation der klaren Vorstellung der kinetischen Energie und hat demnach keinen wissenschaftlichen Wert. Daher wird durch den Nachweis, daß die bisherigen potentiellen Energien entweder kinetisch sind oder in einem Energiemangel bestehen, die Naturwissenschaft erheblich gefördert.

8. Abschnitt.

Die Elektronen.

102 Vor mehr als zweihundert Jahren hat Huyghens in die Wissenschaft die Vorstellung eingeführt, daß der ganze, bisher als leer angesehene Raum von einem feinen Stoff, Äther genannt, angefüllt sei, durch dessen Vermittlung Licht und Wärme im Weltraume verbreitet werde. Da diese überall hin wirken, muß der Äther den Raum lückenlos ausfüllen; und da sich in diesem auch Massen bewegen, muß er deren Bewegungen hemmen. Eine solche Verzögerung müßte auch der Bewegung der Erde um die Sonne zuteil werden. Da man diese aber nicht feststellen konnte, so schrieb man dem Äther Masselosigkeit zu entgegen der allgemeinen Überzeugung, daß kein Stoff ohne Masse sein könne, und man nahm demgemäß auch an, daß Masse und Äther gleichzeitig an derselben Stelle sein können, während bekanntlich eine Masse eine andere an derselben Stelle ausschließt. Solange als man die Energievorstellung noch nicht klar ausgebildet hatte, die jede Energie als an eine Masse gebunden ansieht — ihre Dimensionsformel ml^2t^{-2} enthält auch die Masse —, durfte man etwaige Bedenken gegen die Masselosigkeit zurückstellen. Anders muß es aber werden, seitdem diese Vorstellung das ganze wissenschaftliche Denken beherrscht.

Dann drängt sich die Frage auf, wie die Masse des Äthers aufzufassen ist. Die uns bekannten Massen treten in vier verschiedenen Aggregatzuständen auf, im festen, im flüssigen, im gasförmigen Zustande und in der Gestalt der Crookesschen strahlenden Materie, die nichts anderes ist als die Elektronen. Es fragt sich dann, welchen von diesen vier Aggregatzuständen

man für den Äther in Anspruch zu nehmen hat. Zunächst wird man den festen Zustand daraufhin betrachten, zumal da die ursprüngliche Vorstellung des Äthers als ruhenden Stoffes, wenn auch ohne Masse, mit ihm am meisten übereinstimmt. Nach meiner Auffassung ist ein fester Stoff ein solcher, der aus einem gasförmigen durch Energieabgabe entstanden ist, der jedoch durch Energieaufnahme in den gasförmigen wieder zurückgebildet werden kann. Er ist elastisch, aber nicht vollkommen; er ist dadurch zur Energieübertragung geeignet, gibt aber die Energie nicht vollkommen weiter, sondern behält einen, wenn auch oft nur kleinen Teil davon zurück und kann so eine größere Menge Energie aufspeichern. Dann muß auch der Äther diese Eigenschaften besitzen und muß allmählich seine Festigkeit mehr und mehr verlieren. Nun besteht unser Sonnensystem auf Grund mehrfacher Berechnungen sicher schon viele Millionen Jahre; und während dieser ganzen Zeit hat die Sonne Energie in Gestalt von Licht und Wärme nach außen abgegeben und dadurch den umgebenden Äther mit Energie aufgefüllt. So muß seine Festigkeit schon stark erschüttert sein, und man muß sich wundern, daß sie noch so groß ist, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Energie in ihm 300 000 km beträgt. Aus dieser Geschwindigkeit, die außer Zweifel steht, kann man versuchen, einen Rückschluß auf die Beschaffenheit des Äthers zu machen. Nun hat Newton eine Formel für die Geschwindigkeit des Schalles in Gasen aufgestellt; und man nimmt an, daß sie auch für die Bewegung einer Energie in festen elastischen Stoffen gilt. Sie heißt: $v = \sqrt{\frac{E}{d}}$, wo v die Geschwindigkeit dieser Bewegung, E der Elastizitätsmodul, ein Maß für die Elastizität des Körpers, und d die Dichte des Stoffes ist. Hieraus erhält man die Gleichung: $E = v^2 d$. Da v eine Geschwindigkeit und d eine Masse ist, so hat E die Dimension einer Energie und ist seinem Wesen nach ein Energiemangel, und zwar derjenige, der durch Energiezufuhr beseitigt werden muß, um die Elastizität, also auch den Zusammenhalt der Teile aufzuheben. Ist E und d bekannt, so kann man v berechnen; so hat man für Eisen $v = 4800$ m berechnet; d. h. die Geschwindigkeit der Energieübertragung im Eisen beträgt 4800 m. Umgekehrt kann man E ermitteln, wenn v und d bekannt sind. Nun ist für den Äther $v = 300\,000$ km bekannt, allerdings d nicht. Aber d muß sehr klein sein. Wir wollen dafür einen Näherungswert suchen. Das leichteste Gas ist Wasserstoff und hat, auf Wasser bezogen, die Dichte $9, 10^{-5}$. Noch kleinere Teilchen hat man in den Elektronen erkannt und gefunden, daß ihre Masse den 1800ten Teil eines Wasserstoffatoms beträgt. Nimmt man nun an, daß der Äther aus diesen Teilchen gebildet sei und daß in der Volumeinheit ebenso viel Elektronen sind als Wasserstoffatome bei normalem Druck, so würde $d = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7}$ und $E = 45\ 10^{13}$ erg im gr. cm sec. System sein, also die Arbeit bei Zurückschiebung des elastischen Körpers um 1 cm auf 1 qcm Fläche in der Sekunde. Würden mehr Elektronen in der Volumeinheit Äther sein, als Atome Wasserstoff, so würde d und damit E noch größer werden. Man darf daher den gefundenen Wert als untere Grenze ansehen. Als solcher ist er aber schon sehr groß; denn für Stahl hat man den entsprechenden Wert mit $1{,}84\ 10^{12}$ erg gefunden; also ist E für den Äther mehr als 24 mal so groß; das heißt: der Widerstand, den der Äther dem Eindringen einer Energie von außen entgegensetzt, ist 24 mal so groß, als der, den das elastische Eisen leistet. Dann würde die lebendige Kraft der Erdbewegung auf ihrer Bahn um die Sonne durch einen festen Äther, wie eine einfache Rechnung zeigt, nach einem Wege von 5093 km oder nach dem Verlaufe von noch nicht ganz 3 Min. aufgezehrt sein. Danach kann man den Schluß ziehen, daß nach

unseren jetzigen Kenntnissen ein fester Äther als Überträger der Lichtenergie nicht in Frage kommt, selbst wenn er aus Elektronen gebildet wäre*).

Die Anhänger der bisherigen Äthertheorie können die Formel $E = v^2 d$ auch für sich in Anspruch nehmen: wenn in ihr die Masse des Äthers gleich absolut Null gesetzt wird, so wird E, die Widerstandsarbeit auch gleich Null. Aber dann machen sie grade die, unserem jetzigen ganzen Naturerkennen widersprechende Annahme, daß die Übertragung von kinetischer Energie ohne einen Massenträger möglich sei. Eine derartige Annahme darf bei dem jetzigen Stande der Wisserschaft nicht ohne die sorgfältigste Prüfung gemacht werden. Auch läßt die bisherige Auffassung völlig ungeklärt, weshalb die Lichtgeschwindigkeit grade 300 000 km beträgt, da bei einer Masse Null auch der Elektrizitätsmodul bei jeder beliebigen Geschwindigkeit Null sein muß.

Der flüssige und der gasförmige Zustand kommen für den Äther nicht in Frage; denn für den gasförmigen Zustand ist die mittlere Geschwindigkeit der Luftmolekeln auf 485 m bei 0 °C und die Geschwindigkeit der Energiefortpflanzung auf 330 m festgestellt worden: und die Zuwüchse durch Temperatursteigerung sind so gering, daß damit keine Geschwindigkeit von 300 000 km begründet werden kann. Und der flüssige Zustand als Zwischenzustand zwischen festem und gasigem kann selbstverständlich auch nicht in Frage kommen. Es bleiben daher nur noch die Elektronen in der Form frei beweglicher Massen als Träger der Lichtenergie übrig.

103 Diese sind bereits vor 60 Jahren von Hittorf in der Gestalt der Kathodenstrahlen untersucht worden, ohne daß seine Forschungsergebnisse damals die verdiente Wertschätzung der Wissenschaft gefunden hätten. Daß die in diesen Strahlen übertragene Energie an einen Massenträger, Elektron genannt, geknüpft und daß dessen Masse auf $^1/_{1800}$ eines Wasserstoffatoms zu schätzen sei, ist erst später festgestellt worden, im wesentlichen durch die grundlegenden Untersuchungen Lenards. Nach der jetzt herrschenden Ansicht ruhen die Elektronen vorerst in dem Metall der Kathode der Geißlerschen Röhre; sie werden aus ihm durch den Energiezufluß eines Induktionsstromes hoher Spannung, der die Kathode glühend macht, ausgetrieben und fliegen gradlinig fort. Sie stoßen auf die Glaswand, rufen dort Fluoreszenzerscheinungen hervor, wobei sie einen Teil ihrer Energie abgeben, und können auch in den Außenraum der Röhre dringen, wenn ihr Weg sie durch ein sogenanntes Fenster, eine dünne Metallplatte in der Wand der Röhre, führt. Lenard hat ferner gezeigt, daß sich die Elektronen in spiraligen Bahnen um ihre gradlinige Bewegungsachse bewegen, also Träger einer Schraubenenergie sind, daß eine geeignete Krümmung der Kathodenoberfläche die Elektronen zwingt, sich in einem Punkt zu vereinigen und durch ihn hindurchzugehen und in ihm Wärmewirkungen hervorzurufen, wie man sie an Lichtstrahlen beobachtet, die in Hohlspiegeln reflektiert oder durch Glaslinsen gebrochen werden, und schließlich, daß die Geschwindigkeiten der Elektronen

---

*) Die kinetische Energie der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne ist gleich $\frac{1}{2} m v^2$, wo $m = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot D$ und R, der Erdradius, $= \frac{4 \cdot 10^9}{2\pi}$, $D = 6$ und $v = 30$ km / sec. bedeutet. E ist mit dem größten Querschnitt der Erde, also mit $R^2 \pi$ zu multiplizieren, um die Widerstandsarbeit des Äthers gegen das Eindringen der Erde um ein cm in ihn zu ergeben. Bezeichnet dann x den ganzen Weg, den die Erde bis zur Aufzehrung ihrer Energie im Äther zurücklegt, so besteht die Gleichung: $x \cdot E \cdot R^2 \pi = \frac{1}{2} D \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 v^2$ und es ist $x = \frac{2}{3} \cdot \frac{D R v^2}{E} = \frac{2}{3} \cdot 6 \cdot \frac{4 . 10^9}{2\pi} \cdot \frac{9 \cdot 10^{12}}{4{,}5\, 10^{13}}$ cm $= \frac{16}{\pi} 10^8$ cm $= 5093$ km.

mit abnehmendem Gasdruck in der Röhre, also mit entsprechend größerer Spannung des Induktionsstromes zunehmen und sich der Geschwindigkeit des Lichtes mehr und mehr nähern. Ihr Verhalten hat mit dem der Lichtstrahlen manche Ähnlichkeit; und demnach ist die Frage berechtigt, ob sie nicht mit dem Lichte verwandt, vielleicht identisch sind. Dann würde auch im Lichtstrahl als Träger der Energie die Masse eines Elektrons stecken; und es käme darauf an, die Verschiedenheit der Vorgänge in Licht- und Kathodenstrahlen unter der Voraussetzung der gleichen Ursache zu erklären.

Die Kathodenstrahlen werden durch elektrische Ströme hervorgerufen, während das Licht von einem glühenden Körper ausstrahlt. Doch ist dies kein besonderer Unterschied, da auch die Kathode erst zum Glühen gebracht werden muß, um Kathodenstrahlen zu liefern, so daß der Glühzustand als die allgemeine Voraussetzung für die Bildung beider Strahlenarten angesehen werden kann. In beiden Fällen sind in den Atomen der glühenden Körper heftige Schwingungen vorhanden. Der Zusammenhang der festen Metallmassen ist noch so stark oder ihr Energiemangel ist noch so groß, daß die einzelnen Atome sich nicht voneinander trennen können; aber die Schwingungen dieser Atome nebeneinander sind schon so heftig, daß die in ihnen ruhenden Elektronen beim Vorschwingen zwar die Atombewegung mitmachen, beim Rückschwingen aber diese Bewegung beibehalten und sich so von dem Atom lösen. Dann muß mit der Steigerung der Temperatur auch die Geschwindigkeit der austretenden Elektronen wachsen, bis bei der Weißglut das Maximum erreicht ist. Eine weitere Steigerung würde die Vergasung des glühenden Körpers veranlassen, wobei sich Atom und Elektron zusammen loslösen. Hiermit ist die Maximaltemperatur des glühenden Körpers erreicht und gleichzeitig die Maximalgeschwindigkeit der sich loslösenden Elektronen, die die Beobachtung auf 300 000 km festgesetzt hat. Ich nehme daher an, daß die glühende Sonne ständig Elektronen aussendet, die in den Lichtstrahlen zu uns kommen und deren Energie Licht und Wärme bringt. Die Wärme ist nicht so groß, daß die parallelen Strahlen einen Körper auf der Erde zum Glühen bringen; aber sie ist groß genug, dies Glühen zu veranlassen, wenn die Strahlen durch eine Linse auf einen Punkt vereinigt werden. Die Elektronen sind demnach die Lichtpartikeln der Newtonschen Emissionstheorie des Lichtes; und ihre Wirkung beruht auf der in ihnen enthaltenen Energie und nicht in elektrischen Ladungen von (+ e) und (— e).

104 Hier drängt sich die Frage auf, ob die auf der Erde nachgewiesenen Elektronen und die nach meiner Ansicht in gleicher Weise von der glühenden Sonne ausgehenden Elektronen mit der Äthervorstellung vereinbar sind, d. h. ob Elektronen und Äther beide nebeneinander bestehen können. Wird dem Äther Masse zugeschrieben, so müssen die auf ihn stoßenden Elektronen an ihn Energie abgeben, also, wenn er fest ist, den Zusammenhang seiner Teile lockern und auf einer längeren Wegstrecke ihre ganze Geschwindigkeit verlieren: sie würden dann selbst die Rolle von Äther spielen. Allmählich würde ein fester Äther den Zusammenhang seiner Teile ganz aufgeben und zwar von der Sonne an beginnend. Er würde beweglich werden und mit der Zeit die Geschwindigkeit der Elektronen annehmen, nur mit dem Unterschiede, daß sich die Elektronen alle gradlinig von der Sonne ausstrahlend, ausbreiten, die Ätherteile infolge ihrer Zusammenstöße unter sich und mit den Elektronen ihre Bewegungen nach allen Richtungen ausführen würden. Dann müßten die Elektronen den Äther in unmittelbarer Nähe der Sonne schon vertrieben haben und dort allein tätig sein; und wenn dieser stets wachsende Raum bis zur Erdbahn gelangt wäre, so würde die Erde ihre von

der Sonne kommende Energie allein durch die Elektronen erhalten. Man sieht, daß die nachgewiesenen Elektronen im Sonnensystem den Äther verdrängen müßten, wenn der Äther Masse hat und die bekannten Naturgesetze allgemein gelten.

Hat der Äther dagegen keine Masse, so wirken Elektronen und Äther nicht aufeinander; dann werden beide die Sonnenenergie, unabhängig voneinander, zu uns übertragen; beide erfüllen nebeneinander dieselbe Aufgabe und entwickeln, obwohl der Mechanismus der Energieübertragung ein ganz verschiedener ist, merkwürdigerweise dieselbe Geschwindigkeit von 300 000 km. Diese Übereinstimmung ist aber völlig unverständlich bei der Verschiedenheit der Vorstellungen von Äther und Elektronen, soweit von einer Vorstellung des Äthers überhaupt die Rede sein kann; den Anhängern der Äthertheorie fällt nun die Aufgabe zu, eine befriedigende Äthervorstellung zu bilden, die auf das Vorhandensein der Elektronen Rücksicht nimmt.

105 Von den Elektronen kann man sich folgende weiteren Vorstellungen machen. Die im Glühzustand aus den Atomen fortgeschleuderten Elektronen haben deren Eigenschwingungen angenommen und behalten sie bei, bis sie durch vielfache Zusammenstöße in etwas abgeändert wird. Stößt ein solches Elektron auf ein Atom desselben Elementes, aus dem es sich abgesondert hat, so stimmen die Schwingungszustände beider überein; und das Elektron wird in die Wirbelbewegung dieses Atoms hineingezogen; es jagt durch dessen Inneres hindurch, um sich dann kraft seiner Geschwindigkeit von ihm zu trennen. Es wird hierbei an das Atom Energie abgeben während der kurzen Zeit der Berührung; doch kann dies nur ein kleiner Teil sein trotz der gewaltigen Energie, die durch die Geschwindigkeit von 300 000 km bedingt wird, weil zur Energieabgabe Zeit gehört. Durch Zusammenstöße mit anderen Elektronen füllt es die verlorene Energie wieder auf, bis die Lichtgeschwindigkeit erreicht ist. Stößt ein Elektron auf das Atom eines anderen Elementes, dessen Schwingungszustand mit dem seinigen nicht zusammenpaßt, so fliegt es beim Anprall ohne Energieverlust wieder zurück, so daß sich die Elektronen eines Elementes im allgemeinen nur zu den Atomen dieses Elementes gesellen können. Jedoch im Glühzustand des festen Atoms findet das Elektron irgendeines Elementes Einlaß in das Atom eines anderen Elementes, obgleich sein Schwingungszustand ein anderes Gepräge hat. Die sämtlichen Atome des festen glühenden Körpers haben denselben Schwingungszustand und erhalten sich gegenseitig in demselben, so daß er von heranfliegenden Elektronen nicht beeinflußt wird; anderseits sind die Schwingungen, durch welche sich die einzelnen Teile der Atome nähern und entfernen, so groß, daß ein jedes Elektron zwischen ihnen durchdringen kann. Beim Durchgang nimmt das Elektron die Schwingung dieses Atoms an und behält sie bei, bis es durch ein glühendes Atom eines anderen Elementes fährt. Daher können alle Elektronen an sich gleich sein und trotzdem verschiedene Bewegungszustände annehmen, die den Schwingungszuständen der verschiedenen Elemente angehören. Die Bewegung eines Elektrons ist eine Schraubenbewegung, wobei im leeren Raume die Drehbewegung an sich als kreisförmig anzusehen ist, die aber beim Zusammenstoß mit Atomen oder anderen Elektronen in eine ellipsenförmige oder rein oszillatorische übergehen kann. Dann wird die Lichtenergie durch das Elektron als Träger vermittelt nach der Vorstellung von Newton in seiner Emissionstheorie und durch die Schwingungen um die Bewegungsachse nach der Vorstellung von Huyghens in seiner Undulationstheorie. Und der Streit der beiden großen Männer löst sich auf in der höheren Einheit der Elektronen-

vorstellung. Ja, hätte Newton für seine Lichtpartikeln statt der rein translatorischen Bewegung eine Schraubenbewegung angenommen, so wäre wohl zu seinen Lebzeiten schon eine Einigung über die Natur des Lichtes erzielt worden. Dagegen scheint allerdings der entscheidende Versuch von Foucault zu sprechen, der zugunsten der Undulationstheorie entschieden hat. Die Emissionstheorie suchte die Lichtbrechung dadurch zu erklären, daß sie eine Anziehung der Lichtpartikeln durch das den Lichtstrahl aufnehmende Medium annahm, so daß ein dichteres Medium die Geschwindigkeit des Lichtes vergrößern mußte. Foucault zeigt durch den Versuch, daß das dichtere Medium die Lichtgeschwindigkeit vermindert. Daraus folgt aber nur, daß Newtons Erklärung der Brechung falsch war. Darüber hinaus verliert der Schluß seine zwingende Kraft und wird falsch, wenn die Emissionstheorie die Brechung richtig erklärt.

Ob die Elektronen die letzten kleinsten Teile sind, aus denen sich die Welt aufbaut, darüber kann man nur eine Vermutung aussprechen. Aber wenn sie beim Zusammenstoß unter einer Geschwindigkeit von 300 000 km nicht in Teile zersplittern, so sind sie als die kleinsten Teile so lange anzunehmen, als die Wissenschaft nicht auf noch kleinere geführt wird. Dann darf man sie unter irgendeiner einfachen Form, am besten unter einer Kugel vorstellen. Sie sind dann auch vollkommen elastisch, da sie aus e i n e m Stück bestehen und das Unelastischsein die Verschiebbarkeit der Teile eines Ganzen zur Voraussetzung hat.

Nach dem Vorstehenden verhalten sich die Elektronen eines Elementes zu den Atomen anderer Elemente verschieden, je nachdem das Atom im Glühzustand ist oder nicht. Im ersten Falle wird es zu einem Elektron des neuen Elementes umgeprägt, im zweiten Falle wird es reflektiert. Zwischen diesen beiden Vorgängen muß es einen Übergang geben, bei dem die Reflexion aufhört und das Eindringen in und durch das Atom gelingt, etwa bei beginnender Rotglut. Dann schwingen die Teile eines Atoms noch nicht so schnell und so weit, daß das fremde Elektron durch es ohne Schwierigkeit hindurchgleitet. Es wird sich an den Wänden des Atoms stark reiben und es mit bedeutend verminderter Geschwindigkeit verlassen. Durch die abgegebene Energie wird das Atom dem Glühzustand schneller zugeführt. Je mehr es sich diesem Zustand nähert, desto geringer wird der Geschwindigkeitsverlust, bis er bei vollem Glühzustande ganz verschwindet. Diese Vorgänge beobachtet man bei den Kathodenstrahlen; sie äußern sich in der verschiedenen Geschwindigkeit der Elektronen.

106 Es ist nun die Frage zu erledigen, wie wir uns den Raum mit diesen Elektronen erfüllt denken müssen, damit sie alle die Wirkungen ausführen können, die man bisher dem Äther zugeschrieben hat. Nun werden nach meiner Ansicht von allen glühenden Körpern in jedem Augenblick große Mengen Elektronen fortgeschleudert; dann muß die Sonne in jeder Sekunde ungezählte Mengen abgeben, die sich im Weltenraume ausbreiten; auch die übrigen Sonnen tragen zu dieser Anfüllung des Weltenraumes emsig bei. Ja bei dem langen Bestande des Sonnensystems müßte der endliche Vorrat an Elektronen in der Sonne als erschöpft angenommen werden und der Zufluß von Wärme und Licht uns unbegreiflich erscheinen. Wir müssen daraus den Schluß ziehen, daß dem Abfluß auch ein Zufluß entspricht; und wenn zwischen Zufluß und Abfluß der Beharrungszustand erreicht ist, müssen zu der Sonne ebensoviel Elektronen zurückkehren als von ihr ausgehen; nur wird sich der Unterschied zeigen, daß die fortgeschleuderten an jeder Stelle unter sich parallele Richtungen haben, während die zurückkehrenden aus allen Richtungen den einzelnen Punkten der Sonnenoberfläche zuströmen.

Das setzt aber voraus, daß der Raum um die Sonne und demnach der ganze Weltraum dicht mit Elektronen erfüllt ist, die aus allen Richtungen kommen und gehen. Sie stoßen auf ihrer gradlinigen Bahn auf andere Elektronen und werden dadurch in eine neue Bahn gelenkt, sie stoßen auf Massen und werden entweder zurückgeworfen oder jagen durch sie hindurch; sie geben dabei von ihrer Energie ab und erwärmen die Massen; aber sie füllen in dem großen Elektronenmeere die abgegebene Energie wieder auf; auch nimmt dieses die auf die Massen übertragene Energie wieder als strahlende Wärme auf.

Sie mögen den Raum so dicht und noch dichter ausfüllen als die Gase an der Erdoberfläche, so daß in der Volumeinheit in jedem Augenblick so viel oder mehr Elektronen enthalten sind als Molekeln. Dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß die von der Sonne unter sich parallel ausgehenden Elektronen auf ihrer Bahn bis zur Erde von diesem gradlinigen Wege abgelenkt werden, nicht sehr groß. Im Vergleich zu den Gasen ist die Möglichkeit der Zusammenstöße der Elektronen im Weltenraume stark beschränkt, einmal infolge der ungeheuren Geschwindigkeit, die über 600 000 mal diejenige einer Luftmolekel übertrifft und zweitens wegen des geringen Querschnittes eines Elektrons, der etwa auf den 1400. Teil desjenigen einer Luftmolekel zu schätzen ist. Immerhin wird ein Teil von ihnen aus ihrer Richtung abgelenkt und erreicht daher den Ort nicht, nach dem die Anfangsrichtung führt; und je weiter der Abstand des Sterns von unserem Beobachtungspunkte der Erde wird, desto weniger Elektronen gelangen von diesem Strom in das Auge des Beobachters. Die Anzahl der von einem Stern zu uns kommenden parallel gerichtet sich bewegenden Elektronen kann so gering werden, daß die Netzhaut die Einwirkung auf sie nicht zum Bewußtsein des beobachtenden Astronomen weiter leitet. Nach der Elektronenvorstellung muß das Licht der sehr entfernten Sonnen unsichtbar bleiben, während nach der Äthervorstellung eigentlich das Licht aller Sonnen uns treffen muß.

Unter der Annahme, daß in 1 cbm Weltraum ebensoviel Elektronen in jedem Augenblick vorhanden sind wie in 1 cbm Luft an der Erde, müssen sich die in ihnen enthaltenen Energien verhalten wie die Produkte aus den Massen und den Quadraten der entsprechenden Geschwindigkeiten: dann ergibt die Rechnung, daß ein cbm Elektronen mehr als 7 000 000 mal so viel Energie enthält als ein cbm Luft an der Erdoberfläche; da diese Energie in jedem cbm enthalten ist, so erkennt man, welche ungeheure Energiemenge in den Elektronen des Weltraumes aufgespeichert ist und daß die ganze in den glühenden und nicht glühenden Massen der Welt vorhandene Energie sehr klein ist gegen diese Elektronenenergie. Dies Ergebnis steht in schroffem Gegensatz zu der sich grade jetzt geltend machenden Lehre, daß in den fsten Stoffen der Erde auf Grund der in ihnen als dauernd ruhend gedachten Elektronen unermeßliche Mengen Energie angesammelt sind. Die Anhänger dieser Lehre vergessen nur zu erklären, weshalb diese, in den Massen angehäuften Mengen nicht nach den Stellen minderer Energie abfließen und weshalb sie diese festen Massen nicht in den flüssigen und gasigen Zustand überführen, und damit die feste Erdrinde verflüssigen und verdampfen; sie finden auch keine Schwierigkeit in der Annahme, daß die Elektronen in den Massen ruhen sollen, während ihnen die Fähigkeit zugeschrieben wird, dann ohne weiteres eine Geschwindigkeit von 300 000 km zu entwickeln.

Aber eine andere Frage drängt sich auf, ob diese Elektronen mit ihrer gewaltigen Energie nicht der Bewegung der Erde um die Sonne einen erheblichen Widerstand entgegensetzen müssen, einen Widerstand, den man auch

vom festen Äther erwartete. Aber die Erde wird nicht nur von den Elektronen getroffen, die sich der Erdbewegung entgegenstemmen, sondern auch von denen, die die Erde vorwärts treiben. Beide heben sich in ihrer Wirkung gegenseitig auf, so daß die Erde von der Gesamtwirkung unbeeinflußt bleibt. Man könnte darauf hinweisen, daß auf der Vorderseite der Erde infolge ihrer Bewegung in einer Sekunde mehr Stöße als auf der Rückseite wirkten. Aber in jedem Zeitmomente müssen sich die Stöße auf der Vorder- und Rückseite in ihrer Wirkung aufheben, folglich in allen. Nur wenn die Geschwindigkeit der Erde größer als die der Elektronen wäre, könnten die letzteren aus diesem Grunde die Bewegung hemmen. Nun muß man aber ferner bedenken, daß die Elektronen vollkommen elastisch sind, daß sie daher die Energie, mit der sie anprallen, auch wieder mitnehmen, also gar keine Energie auf die Erde übertragen und demnach den Bewegungszustand unverändert lassen.

107 Hier mag gleich die scheinbar nicht in unmittelbarem Zusammenhange mit dem Gegenstande stehende Frage berührt werden, wie viel die Sonne jährlich durch Strahlung an Energie verliert. Bekanntlich hat Pouillet mit seinem Pyrheliometer die Wärmeabgabe der Sonne auf 1 qcm der Erdoberfläche gemessen und daraus berechnet, daß sie im Laufe eines Jahres imstande sei, einen 36 m dicken Eishimmel zu schmelzen, dessen Radius gleich dem der Erdbahn wäre. Man hat darauf weiter berechnet, daß sich die Sonne in 5000 Jahren um 3000° abkühlen müsse. Da die Sonnenglut auf 6000° geschätzt wird, so müßte ihre Wärme in 10 000 Jahren erschöpft sein und also schon viel früher der Wärmetod auf der Erde eintreten; aber vor 5 000 Jahren müßte die Sonne die eineinhalbfache Glut gehabt haben, was bei dem nachgewiesenen Gleichbleiben des Klimas nicht gut möglich ist. Daher hat Helmholtz darauf hingewiesen, daß die Sonne bei ihrem Zusammenziehen Wärme erzeugen müsse, und berechnet, daß die Zusammenziehung um ein Zehntausendstel genüge, um den Wärmeverlust nach Pouillet auf 2000 Jahre zu decken. Gegen diesen Gedanken von Helmholtz drängen sich aber die erheblichsten Bedenken auf.

Wenn Gase durch Druck zusammengepreßt werden, werden sie erwärmt; es geht die bei der Zusammenpressung aufgewendete Energie auf die Gase über; wenn aber auf ein eingeschlossenes Gas keine Energie übertragen wird, so bleibt es in dem alten Zustande nach dem Gesetz, daß jede Zustandsänderung in der Natur durch Zufuhr oder Abfuhr von Energie bedingt wird. Wird daher der Sonne keine Energie zugeführt, so können auch die Atome der Sonne keinen Energiezuwachs erhalten. Die Sonne kann zwar ihr Volum verkleinern, aber nur durch Abgabe von Energie ebenso wie ein eingeschlossenes Gas in einer kälteren Umgebung. Helmholtz ist durch die Vorstellung der potentiellen Energie zu seiner Gedankenentwicklung gekommen. Er muß angenommen haben, daß in der Sonne noch potentielle Energie schlummere, die durch die Zusammenziehung der Sonne aus ihrem Schlafe geweckt würde, eine Vorstellung, die allerdings des großen Mannes nicht ganz würdig sein würde. Wenn es aber, wie ich glaube, in dem vorangehenden Abschnitt überzeugend nachgewiesen zu haben, nur kinetische Energie gibt, so kann die dichtere Lage der Atome als solche ihre Bewegungsgröße nicht vermehren. Es muß dieselbe Temperatur bleiben. Aber damit die Kontraktion vor sich geht, muß die Temperatur zurückgegangen sein, also die Sonne Energie verloren haben; und jedes Atom mit verminderter Energie kann auch nur verminderte Energie abgeben; und da die Anzahl der Atome auf der kleineren Oberfläche dieselbe bleibt wie vorher, so muß auch die Gesamtwärme der Sonne und demnach auch ihre weitere Wärme-

abgabe als vermindert angesehen werden. Die Zusammenziehung der Sonne kann keinen Ersatz für die verlorene Energie liefern.

Aber deshalb ist der aus Pouillets Rechnung nach 10 000 Jahren gefolgerte Wärmetod von Sonne und Erde doch nicht zu erwarten. Denn die Elektronenvorstellung läßt einen solchen gewaltigen Verlust der Sonne an Energie gar nicht zu. Wenn nämlich auf der Sonne das Gleichgewicht zwischen Eingang und Ausgang der Elektronen hergestellt ist, so ist eben überhaupt kein Verlust da, soweit die Elektronen zur Sonne zurückkehren. Nun wirken jedoch die Planeten und anderen Massen, die sich um die Sonne bewegen, als Schirm für die aus dem Weltraume kommenden Elektronen und verhindern durch Ablenkung ihres Weges auf die Sonne zu, ihre Rückkehr zur Sonne. Aber diese Massen nehmen, auf eine beliebige um die Sonne als Mittelpunkt gelegte Kugelfläche projiziert, einen so geringen Teil dieser Fläche ein, daß der von Pouillet berechnete Wärmeverlust durch eine sehr große Zahl dividiert werden muß, um der Wirklichkeit nahezukommen. Dazu kommt noch, daß die den Räumen der Abschirmung benachbarten Räume etwas dichter mit Elektronen erfüllt sind und demnach auch etwas mehr Elektronen an die Sonne abgeben.

108 Die Elektronen müssen sich ähnlich untereinander bewegen wie wir uns die Bewegung der Gasmolekeln zueinander vorstellen, nur daß die Geschwindigkeiten von ganz anderer Größenordnung sind. Der Druck der ruhenden Luft wird trotz der heftigen Stöße der einzelnen Molekeln von uns nicht empfunden, da er ausgeglichen wird durch den Luftdruck, der auf den Körper von entgegengesetzter Seite ausgeübt wird. Aus demselben Grunde empfinden wir die gewaltigen Stöße der Elektronen in keiner Weise. Wenn man aber den Luftdruck einseitig aufhebt, z. B. durch das Heben eines auf Wasser ruhenden Pumpenkolbens in einer enganschließenden Röhre, macht sich der von der anderen Seite kommende Luftdruck geltend. In ähnlicher Weise kann man vielleicht einen Vorgang der Kathodenstrahlen in der Vakuumröhre erklären. Hier stoßen die von der Kathode ausstrahlenden Elektronen mit großer Geschwindigkeit auf die umschließende Glaswand, dringen in das Glas ein und durch es durch und stören infolgedessen den Gleichgewichtszustand, der sonst zwischen den Elektronen in der Vakuumröhre und in deren äußerer Umgebung herrscht. In die Leere um die Kathode suchen die Elektronen innerhalb und außerhalb einzudringen. Sie jagen daher auf Grund ihrer Geschwindigkeit von außen durch die Glaswand in die Röhre, reißen von der Innenseite Glaspartikeln in Form von Atomen ab und stürzen mit ihnen, natürlich unter erheblich verminderter Geschwindigkeit, nach der Kathode hin. Dies sind nach meiner Ansicht die Kanalstrahlen, die dann nicht von der Kathode ausgehen, sondern zu ihr hingehen. Nun hat man festgestellt, daß die Kathodenstrahlen unter dem Einfluß eines Magnets von ihrer Bahn in einem bestimmten Sinne abgelenkt werden. Wenn die Kanalstrahlen nun die Richtung nach der Kathode besitzen, so ist zu erwarten, daß sie in entgegengesetzter Weise abgelenkt werden. Das ist auch der Fall. Nur erklärt bisher die Wissenschaft diese Erscheinung anders. Sie schreibt den Elektronen eine Ladung negativer Elektrizität und den Kanalstrahlen eine solche mit positiver zu und erklärt damit das verschiedene Verhalten der beiden Strahlenarten. Die Entscheidung zwischen beiden Auffassungen dürfte durch einen Versuch gewonnen werden, der nach Art der Crookeschen Mühle die Richtung der Kanalstrahlen bestimmt.

109 Aber so interessant das Ergebnis dieses Versuches für die Kanalstrahlen und Entbehrlichkeit oder Unentbehrlichkeit der positiven und negativen

elektrischen Ladungen sein wird, so hat er für eine Entscheidung zwischen Äther- und Elektronenvorstellung keine unmittelbare Bedeutung. Hierzu sind Versuchsergebnisse erforderlich, die von der einen Theorie vorausgesehen werden, während sie von der anderen nicht erwartet werden dürfen. Ein solches bietet der Michelsonsche Versuch. Michelson nimmt an, daß die Lichtgeschwindigkeit im Äther immer dieselbe Größe hat. Da der Äther überall dieselbe Beschaffenheit hat, muß die Bewegung aus diesem Grunde überall dieselbe sein. Hätte er auch Masse, so würde die Lichtgeschwindigkeit abnehmen können, indem ein Teil derselben auf die Äthermasse übergehen könnte. Da er aber keine Masse haben soll, so ist kein Grund vorhanden, daß die Bewegung nicht gleichförmig wäre. Daraus wird dann gefolgert, daß auch bei dem Zusammenstoß des Äthers mit Massen die Geschwindigkeit im Äther sich nicht ändern könne; damit ist die Allgemeingültigkeit des Gesetzes vom Parallelogramm der Geschwindigkeiten aufgehoben, indem es nur für die den Massen erteilten Geschwindigkeiten gilt. Michelson hat nun auf Grund dieser Voraussetzung berechnet, daß bei ruhendem Äther ein von einem Punkt der sich bewegenden Erde nach einem zweiten gehender und von da nach dem ersten zurückkehrender Lichtstrahl je nach dem Winkel, den er mit der Richtung der Erdbewegung um die Sonne macht, verschieden große Zeiten gebrauchen müsse, so daß zwei Lichtstrahlen, die in gleicher Phase nach verschiedenen Richtungen von der Lichtquelle ausgehen, in verschiedener Phase zu ihr zurückkommen und daß sich diese Tatsache, wenn die Strahlen zur Koinzidenz gebracht werden, in Interferenzerscheinungen geltend machen muß. Ein dahingehender Versuch ergab aber keine Interferenz der Strahlen, hätte sie jedoch bei der Feinheit der Instrumente sicher zeigen müssen, wenn sie tatsächlich vorhanden war. Michelson suchte das Ausbleiben der Interferenz dadurch zu erklären, daß er eine neue Hypothese über den Äther machte, daß dieser nicht ruhe, sondern sich mit der Erdgeschwindigkeit bewege. Ohne weiter hier auf die Bedenklichkeit dieser Annahme an sich einzugehen, hatte sie den Nachteil, mit der bisher geltenden Erklärung der Aberration der Fixsterne in Widerspruch zu stehen, welche einen ruhenden Äther zur Voraussetzung hat. Der Holländer Lorentz schlug einen anderen Weg ein, die Beobachtung mit der Äthertheorie in Einklang zu bringen, indem er eine Volumänderung des Beobachtungsinstrumentes annahm. Da jede Änderung des Naturzustandes mit einer Verlagerung von Energie begründet wird, so würde diese Verlagerung nachgewiesen werden müssen, was jedoch nicht geschehen ist und was aus der aufgestellten Rechnung abzuleiten kaum möglich sein dürfte. Einstein hat die Schwierigkeit durch Aufstellung seiner Relativitätstheorie zu beseitigen gesucht.

110 Es soll nun gezeigt werden, daß auf Grund der Elektronentheorie das Ergebnis des Michelsonschen Versuches notwendig ist. Der Versuch selbst mag um zwölf Uhr mittags angestellt werden, weil dann die Richtung West-Ost mit der Bewegung der Erde auf ihrer Sonnenbahn zusammenfällt. Michelson gibt dann den Sonnenstrahlen durch Spiegelungen einen solchen Weg, daß sie genau von einem Spiegel D im Westen kommend und horizontal verlaufend, auf eine vertikale Glasplatte A fallen, die gegen die West-Ost-Linie um 45° geneigt ist. Hier werden die Strahlen zerlegt in einen Teil, der genau nach Norden reflektiert wird und in C auf einen Spiegel trifft, der sie wieder nach Süden zurückwirft, und in einen anderen, der durch das Glas dringt und in östlicher Richtung zu einem Spiegel B gelangt, der die Strahlen in westlicher Richtung nach A zurückwirft. Die Entfernungen A B und A C sind gleich. Ein Teil der von C kommenden Strahlen dringt durch die Glasplatte in A hindurch, ein Teil der von B zurückkommenden Strahlen wird von der-

selben reflektiert, beide Teile haben die Richtung nach Süden und werden in einem Fernrohr aufgefangen und auf Interferenzerscheinungen beobachtet.

Die Zeit, die das Elektron von A nach C oder B gebraucht, d. h., um diese Strecken allein auf Grund der Lichtgeschwindigkeit Vo zu durchlaufen, sei τ. Das von der Sonne kommende im Westen von einem Spiegel in D reflektierte Elektron hat vor der Reflexion bei D die Lichtgeschwindigkeit Vo und behält diese bei der Reflexion unter Richtungsänderung bei, erhält aber durch die Erdgeschwindigkeit v einen Zuwachs in derselben Richtung, so daß die Gesamtgeschwindigkeit Vo + v ist. Mit dieser Geschwindigkeit stößt es auf den Spiegel in A, um reflektiert zu werden. v ist dazu erforderlich, daß es dem Spiegel in seiner Bewegung folgt; demnach erfolgt die Reflexion nur mit Vo, mit der es sich nach Norden weiterbewegt. Dann steht es unter dem Einfluß zweier aufeinander senkrechter Geschwindigkeiten, so daß es der Diagonale des entsprechenden Parallelogramms folgt und in der Zeit τ nicht nach C, sondern nach C_1 gelangt, wohin jedoch der Punkt C des Spiegels auch gelangt ist. Gleichzeitig ist A nach A_1 und B nach B_1 gekommen. Bei der neuen Reflexion in C_1 behält das Elektron v bei, um dem Spiegel zu folgen, während Vo reflektiert wird und die entgegengesetzte Richtung erhält. Auf Grund beider gelangt es in der neuen Zeit τ nach A_2, wohin sich auch A bewegt hat, und durchdringt die Glasplatte in A (A_2) wieder mit Vo, während v dafür sorgt, daß das Elektron die Bewegung dieser Platte mitmacht.

Geht ein anderes Elektron in gleicher Phase mit dem ersten von D aus, durchdringt die Glasplatte in A, so gelangt es nach τ infolge von Vo nach B und durch v von B nach B_1, wohin jedoch der Spiegel in B gleichfalls gekommen ist, wird dort reflektiert und fliegt mit Vo zurück, während es durch v weiter nach Osten getrieben wird. Durch v allein würde es nach B_2, durch Vo allein nach A_1 getrieben innerhalb der Zeit τ; also gelangt es durch beide zusammen nach A_2, wohin auch die Platte A und das erste Elektron gleichzeitig gelangt. Hier wird es mit Vo nach Süden reflektiert, gewinnt durch die Platte A Geschwindigkeit v nach Osten, ist demnach in demselben Bewegungszustande wie das erste. Demnach müssen beide Elektronen, wenn sie in gleicher Phase von D ausgegangen sind, in A_2 in gleicher Phase sich weiter bewegen, es können also beide keine Interferenzwirkungen verursachen.

Gegen diesen letzten Schluß könnte man einen Einwand erheben, der, soviel ich weiß, jedoch noch nicht gemacht ist, daß nämlich bei Reflexionen und Durchdringen von Glasplatten Zeit verloren geht. Daß hierbei Zeitverluste auftreten, ist durchaus nicht unwahrscheinlich; aber beim Michelsonschen Versuch müssen diese Zeitverluste für beide Strahlen gleich sein; denn jeder der beiden von D ausgegangenen Strahlen erleidet zwei Reflexionen und eine Durchdringung derselben Glasplatte, bis er von dieser weiter nach Süden geht.

Die Betrachtung zeigt, daß v immer die Richtung West-Ost beibehält, nämlich die des ganzen sich bewegenden Systems (der Erde) und daß nur Vo durch Reflexion die Richtung ändert. Man hat es daher mit der Übereinanderlagerung zweier Bewegungen zu tun, der Bewegung eines festen Systems und der Bewegung in diesem festen System. Die Darstellung stützt sich also auf dieselben Grundsätze, die bei jeder Kombination von Bewegungen angewendet werden, die geometrische Zusammensetzung. Es ist kaum nötig, hervorzuheben, daß die Verhältnisse dieselben bleiben, wenn das beim Versuche benutzte Licht nicht reflektiertes Sonnenlicht, sondern ein durch Glühen auf der Erde erzeugtes ist; denn dieses hat von Anfang an die Geschwindigkeit der Erde. Auch wenn man direktes Sonnenlicht am Morgen oder Abend anwendet, ist das Ergebnis dasselbe, nur daß in diesem Falle die Komponente der Erdgeschwindigkeit, die in die Richtung der beim Versuch benutzten

Strahlen fällt, gleich Null ist. Bei dieser ganzen Darlegung ist bisher nicht die Drehungsgeschwindigkeit der Erde um ihre Achse berücksichtigt, die nicht ganz einen halben km am Äquator beträgt und bei einem Versuche um Mittag v um diesen Betrag vermindert. Aber während des Versuches bleibt dieses neue v unverändert, also muß auch das Ergebnis dasselbe bleiben.

111 Die ganze Auseinandersetzung deckt gleichzeitig auf, in welchem Punkte die Äther- und die Elektronenvorstellung auseinandergehen und sich immer unterscheiden werden. Der Äther ist etwas von der Erde und der Erdbewegung Unabhängiges; zwischen ihnen besteht kein Band. Ein Lichtstrahl, der von der Erde ausgeht, wird dem Äther überantwortet und nach dessen eigenen, uns nicht bekannten Gesetzen weiterbewegt. Das Elektron enthält seine Bewegungsgröße in sich; diese kann sich auch mit anderen Bewegungsgrößen, z. B. der der Erde, zusammensetzen, und man muß diese mit in Rechnung stellen. Die Lichtgeschwindigkeit ist daher nicht konstant, wenn sie auch um einen großen Mittelwert nur wenig schwankt. Beim Michelsonschen Versuch entspricht dem vermehrten oder verminderten Wert derselben auch ein vermehrter oder verminderter Weg des Elektrons, aber derart, daß die Zeit dieselbe bleibt, wodurch eben Interferenzerscheinungen unterdrückt werden. H. A. Lorentz übersieht diesen Umstand in seinen Rechnungen und kommt daher zu Ergebnissen, die durch den Versuch nicht bestätigt werden.

Die Bedeutung des Michelsonschen Versuches beruht darin, daß zu der Beobachtung Bradleys ein willkürlichen Änderungen unterworfener Versuch hinzugefügt worden ist, der die Bewegung der Erde mit der Lichtgeschwindigkeit kombiniert; und das bisherige Ergebnis ist, daß beide wissenschaftlichen Feststellungen sich gleichzeitig weder durch den ruhenden noch den sich mit Erdgeschwindigkeit bewegenden Äther erklären lassen. Damit ist aber die Bahn freigegeben, sich nach anderen Versuchen umzusehen, um die in bezug auf den Äther schwebenden Fragen einer Lösung zuzuführen. Vor allem ist die Frage zu beantworten, ob das Dogma der Unveränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit aufrecht erhalten werden kann. Die gegebene Erklärung von Michelsons Versuch setzt die Veränderlichkeit dieser Geschwindigkeit voraus. Die bisherigen Messungen ergeben um 50 km voneinander abweichende Werte. Die bekannte Fizeausche Formel $V = Vo + v\,(1 - \frac{1}{n^2})$ spricht gegen die Konstanz, wenngleich sie als Stütze für diese Konstanz verwertet wird. Einen Weg der Untersuchung bietet die Fizeausche Methode der Messung der Lichtgeschwindigkeit mit seinem Zahnradapparate, wenn man kein von irgendeiner Fläche der Erde reflektiertes und daher v enthaltendes Licht, sondern direktes Himmelslicht benutzt, das von der Sonne oder einem Stern ausgeht. Da diese Methode aber Licht voraussetzt, das auf derselben horizontalen Geraden Hin- und Rückweg ausführt, so kann sie nur Sonnen- oder Sternenlicht beim Auf- oder Untergang gebrauchen. Beim Sonnenaufgang und -untergang kombiniert sich die Lichtgeschwindigkeit nur mit der Rotationsgeschwindigkeit der Erde um ihre Achse, die am Äquator noch nicht ganz $^1/_2$ km beträgt: und zwar wird die resultierende Geschwindigkeit am Morgen um $^1/_2$ km kleiner, am Abend größer. Es fragt sich, ob die Fizeausche Methode schon jetzt zu einer solchen Feinheit der Messung ausgebildet werden kann, daß die Beobachtungsfehler unter $^1/_4$ km Weg in der Sekunde liegen. Man wird sich daher eher nach einem geeigneten leuchtenden Stern umsehen, der in der Nähe der Ekliptik liegt und der zu den Zeiten der beiden Tag- und Nachtgleichen in bezug auf seine Lichtgeschwindigkeit gemessen wird. Das eine Mal nähert sich die Erde dem Stern, das andere Mal entfernt sie sich: es müssen sich daher in beiden Fällen verschiedene Ge-

schwindigkeiten ergeben, wenn die Elektronentheorie richtig, dagegen dieselbe, wenn die Lichtgeschwindigkeit absolut konstant ist.

112 Es bleibt noch übrig, zu untersuchen, ob die Bradleysche Beobachtung gleichfalls aus der Elektronentheorie erklärt werden kann. Die jetzige Lehre stützt sich auf die Zusammensetzung zweier Geschwindigkeiten zu einer resultierenden, wie wir sie zur Erklärung des Michelsonschen Versuches verwertet haben. Demnach scheinen die Voraussetzungen für beide Erklärungen dieselben zu sein. Die eben gegebene hatte ihre Grundlage in der Tatsache, daß die Vorgänge in einem nur translatorisch bewegten System so verlaufen wie wenn das System ruhte. Wäre nun bei der Bradleyschen Beobachtung die Erde in Ruhe, so müßte sich der Lichtstrahl in der Fernrohrachse weiter bewegen und könnte keine Aberration zeigen. Da sie sich translatorisch fortbewegt, so muß die Aberration gleichfalls unterbleiben, was jedoch nicht geschieht. Die geltende Erklärung übersieht die Tatsache, daß das Licht des Fixsterns beim Eintreten in das Fernrohr sich mit der Erdgeschwindigkeit zusammensetzen und demgemäß in der Achse des Fernrohrs fortbewegen muß infolge der Geschwindigkeitskomponente der Erde, die das Licht beim Auftreffen auf das Fernrohr aufgenommen hat. Das Licht muß deshalb mit Hilfe dieser Komponente auch die Bewegung des Auges mitmachen, so daß die Aberration auf Grund der bisherigen Erklärung nicht stattfinden dürfte. Nur die Annahme, daß das beobachtende Auge die Bewegung der Erde mitmacht, daß dagegen das Licht beim Durchgang durch das, dieselbe Bewegung mitmachende Fernrohr von dieser Bewegung unbeeinflußt bleibt, macht die Erklärung möglich. Wäre sie aber richtig, so müßte das Auge in jedem Falle, nicht nur bei der Beobachtung eines Sternes, eine Verschiebung in der Richtung des Gegenstandes beobachten; und wenn alle Gegenstände auf der Erde diese Verschiebung für das Auge mitmachten, so würden auch die festen Punkte des Observatoriums, die die Nord-Süd-Richtung festlegen, dieser Verschiebung unterliegen; man würde dann aber die Verschiebung selbst nicht feststellen können. Ich schließe daraus, daß die bisherige Erklärung der Bradleyschen Beobachtung nicht richtig sein kann, und daß erst eine allgemein befriedigende gefunden werden muß, ehe eine Theorie nur darum verworfen werden darf, weil sie mit der jetzigen Erklärung der Aberration nicht in Einklang steht. Einen Weg zur richtigen Erklärung kann der Vergleich zwischen dem Verlauf des Michelsonschen Versuches und des Vorganges, der der Bradleyschen Beobachtung zugrunde liegt, andeuten. Da zeigt sich der bemerkenswerte Unterschied, daß beim Michelsonschen Versuch zwei Strahlenbündel zur Beobachtung kommen, die die gleichen Wege durchlaufen, dieselben Reflexionen an und dieselben Brechungen in einer Glasplatte erleiden, nur in geänderter Reihenfolge, während bei der Bradleyschen Beobachtung nur ein Bündel Lichtstrahlen die beiden Gläser des Fernrohrs durchsetzt. Die Durchsetzung und Brechung in den Gläsern ruft eine nicht erwartete Erscheinung hervor, während gleiche Wege, gleiche Reflexionen und gleiche Brechungen eine solche ausfallen lassen. Man darf daraus den Schluß ziehen, daß der Durchgang durch die Gläser die Aberration hervorruft, daß dagegen die gleichen Vorgänge in den Strahlenbündeln beim Michelsonschen Versuch sich gegenseitig kompensieren. Der Durchgang durch Glas verlangsamt die Geschwindigkeit der Lichtelektronen; demnach kommen sie an der Augenoberfläche später an, als wenn sie durch die Luft gegangen wären. Daher ist ein Punkt der Netzhaut in die Achse des Fernrohrs gekommen, der beim Auftreffen des Sternenlichtes auf die erste Glaslinse noch nicht an dieser Stelle war, sondern noch zu ihr hinstrebte. Ob auf diesem Wege eine befriedigende Erklärung gefunden werden kann, muß die Zukunft zeigen. Wird sie ge-

funden, so wird die unmittelbare Berechnung der Lichtgeschwindigkeit aus der größten beobachteten Aberration von 20″ wohl hinfällig werden, obgleich sie mit den anderen Berechnungen so gut übereinstimmt. Aber die neue Erklärung wird auch den Zusammenhang zwischen der Lichtgeschwindigkeit und den 20″ Aberration aufdecken. Der von mir angedeutete Weg einer neuen Erklärung hat den Vorzug, zu Versuchen Anlaß zu geben. Wenn nämlich das Eindringen des Lichts in Glas mit einem bestimmten Zeitverluste verknüpft ist, so muß das Einschieben weiterer Linsen oder ebener Glasplatten in das Fernrohr diesen Zeitverlust vergrößern, was einen Zuwachs des Aberrationswinkels nach sich ziehen müßte.

113 Ein weiterer Weg, zwischen Äther- und Elektronenvorstellung zu entscheiden, wird durch die Hertzschen Wellen geboten, unter der Voraussetzung, daß die Träger derselben Elektronen sind. Hertz hat durch Reflexion elektrischer Wellen stehende Wellen erzeugt und deren Knotenpunkte nachgewiesen. Die reflektierende Wand war in nächster Nähe der Erzeugungsstelle der elektrischen Wellen. Wird diese Wand in größerer Entferung davon aufgestellt, so müssen die Erscheinungen verschieden sein, je nachdem der Äther oder die Elektronen die Träger der Energie sind. Im ersteren Falle müssen auch in größeren Entfernungen die Abstände der Knoten voneinander dieselbe Größe behalten, da der Äther überall dieselbe Beschaffenheit haben soll. Im letzteren ist darauf hinzuweisen, daß die Elektronen durch ihre Zusammenstöße mit der Luft etwas von ihrer Energie verlieren und sich auch zerstreuen und daß die Wellenlänge mit der abnehmenden Geschwindigkeit auch abnimmt. Demnach werden sich stehende Wellen überhaupt nur in der Nähe der reflektierenden Wand zeigen, weil nur dort die ankommende und die zurückkehrende Welle noch fast die gleiche Länge hat.

114 Nun komme ich auf einen Einwand, den schon viele von Ihnen bei sich gemacht haben werden: wenn die Elektronen das ganze Weltall erfüllen sollen, wenn sie mit 300 000 km Geschwindigkeit dahinjagen und in jedem cbm eine ungemein große Energie enthalten ist, dann müßte diese die ganze Welt zerstören können; wie kommt es denn, daß man außer der ihnen zugeschriebenen Wärme- und Lichtübertragung solche verheerenden Wirkungen gar nicht bemerkt. Zunächst ist darauf zu bemerken, daß diese Energie nur da zur Wirkung kommen kann, wo sie im Überschuß vorhanden ist; und die Bedingungen dafür sind nicht günstig, da gerade ihre große Geschwindigkeit eine Störung des Energiegleichgewichts leicht wieder zum Ausgleich bringt. Aber diese Wirkungen beobachtet man täglich: die eine ist der freie Fall; und daß ein Bergsturz furchtbare Zerstörungen mit sich bringen kann, ist eine bekannte Tatsache.

Das Rätsel der Schwerkraft ist bisher nicht gelöst worden: die Aufgabe besteht darin, das Newtonsche Gravitationsgesetz, daß die Anziehung zweier Massen diesen Massen direkt und dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional ist, mechanisch zu erklären, also eine für uns vorstellbare Bewegungsursache aufzufinden. Die reine Fernwirkung, die noch vor fünfzig Jahren als eine selbstverständliche Eigenschaft der Materie angesehen wurde, ist im Laufe der Zeit durch eine große Anzahl von Gelehrten mit mehr oder minder befriedigendem Erfolge als Wirkung des Äthers zu erklären versucht worden und wer sich dafür interessiert, dem ist zu empfehlen, die mühevolle und gewissenhafte Arbeit von C. Isenkrahe: „Das Rätsel der Schwerkraft, Braunschweig 1879," die kaum die verdiente Beachtung gefunden hat, kennenzulernen und besonders die Gedanken des Genfers Lesage zu würdigen. Aus dieser ersieht man, daß auch andere Annahmen als die Elektronen, z. B. die angenommenen Ätherstöße, verwertet worden sind, die umgekehrte Propor-

tionalität mit dem Quadrat der Entfernung abzuleiten. Sie wirken wie die Elektronenstöße auf eine einzige im Weltraum befindliche Masse so, daß sie, von den verschiedensten Seiten herankommend, sich in ihrer Wirkung auf die Masse gegenseitig aufheben. Befinden sich aber zwei Körper in dem Raume, so wirkt jeder von ihnen auf bestimmte Elektronen, die auf ihn stoßen, als Schirm in bezug auf den anderen, und zwar für alle, die die Richtung nach dem geschirmten Körper haben und ihre Geschwindigkeit teilweise an ihn abgeben und durch den Zusammenstoß mit den Massen des schirmenden Körpers ihre ursprüngliche Richtung verlieren. Die Elektronen mit geminderter Geschwindigkeit erlangen im Elektronenmeer durch den Zusammenstoß mit anderen Elektronen nach kurzer Zeit die Weltgeschwindigkeit wieder. Der geschirmte Körper erhält nun von allen Seiten Elektronenstöße, nur nicht aus der Richtung des schirmenden Körpers. Demnach muß auf dem geschirmten Körper ein Überdruck in der Richtung nach dem schirmenden Körper entstehen. Da jeder der beiden Körper als Schirm gegenüber dem anderen wirkt, so müssen beide einander entgegengestoßen werden. Je näher die beiden Körper einander stehen, um so größer ist die gegenseitige Schirmwirkung. Bei der halben Entfernung ist die Schirmwirkung viermal so groß, da viermal soviel Elektronen abgewehrt werden, wie ja auch in diesem Falle ein Körper, von dem anderen aus gesehen, viermal so groß erscheint. Danach ist die umgekehrte Proportionalität mit dem Quadrat zu verstehen.

Dagegen ist bisher jeder Versuch, die direkte Proportionalität mit der Masse zu begründen, gescheitert. Nun hat aber Lenard vor längeren Jahren nachgewiesen, daß bei Elektronen größter Geschwindigkeit die Absorption derselben durch einen Körper der Dichtigkeit dieses, also seiner Masse, direkt proportional ist. Lenard hat diesen Nachweis durch die chemischen Wirkungen der Elektronen auf die ihnen ausgesetzten Metalle geführt, indem er die von ihm angenommene Absorption durch die chemische Wirkung maß. In Wirklichkeit handelt es sich nur um einen bestimmten Teil der in den Elektronen steckenden Energie, nach deren Abgabe die Elektronen weiterziehen. Aber die Menge der übertragenen Elektronenenergie ist, ob sie nun chemische oder, wie bei der Gravitation, rein mechanische Wirkungen hervorruft, der Masse, auf die sie übertragen wird, proportional. Nun veranlassen die nach dem ersten Körper hinstrebenden Elektronen, welche von dem zweiten Körper durch seine Masse abgewehrt werden, den Überdruck des ersten Körpers nach dem zweiten hin; also muß auch dieser Überdruck — der Masse des zweiten, des abwehrenden Körpers, proportional sein; oder anders ausgedrückt, die durch den Elektronenüberdruck auf den ersten Körper übertragene Energie ist der Masse des zweiten proportional; und dies heißt in der gebräuchlichen Ausdrucksweise: Die Anziehung des ersten Körpers durch den zweiten ist der Masse des zweiten proportional.

115 Diese Darlegung gilt zunächst nur für nichtleuchtende Körper, z. B. für die Einwirkung der Erde auf den Mond oder auf den berühmten Newtonschen Apfel und sagt aus, daß die Anziehung des ersten Körpers (Mond oder Apfel) durch den zweiten Körper (Erde) der Masse des zweiten Körpers (Erde) proportional ist. Sie gilt aber zunächst nicht mehr für die Beziehung zwischen Sonne und Erde. Denn in diesem Falle wehrt der zweite Körper zwar sehr viele Elektronen von der Erde ab, so daß aus diesem Grunde die Erde nach der Sonne getrieben werden muß. Aber die Sonne ist ein selbstleuchtender Körper und sendet ebensoviele Elektronen aus als sie aufnimmt. Nun üben aber von den, die Erde auf der Schattenseite treffenden Elektronen nur diejenigen Gravitationswirkungen aus, deren Bewegungen gerade auf

die Sonne zu gerichtet sind. Die anderen Elektronenstöße heben sich in ihrer Wirkung auf die Erdbewegung mit denen auf, welche die Erde von gerade entgegengesetzter Richtung treffen. Dagegen sind die von der Sonne nach der Erde gerichteten Elektronen sämtlich befähigt, die Erde von der Sonne hinwegzustoßen. Man müßte daher erwarten, daß diese ihre Bahn um die Sonne aufgäbe und in den Weltenraum hineintriebe. Doch übersieht man hierbei die ständigen Wärmewirkungen der Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche. Man kann nun die Annahme machen, daß die Elektronen, während sie einen Teil ihrer Energie in Wärme umsetzen, nicht gleichzeitig Gravitationswirkungen ausüben können. Dann sind die Verhältnisse nicht wesentlich verschieden von denen bei der Einwirkung nichtleuchtender Massen aufeinander. Sollten dagegen diese Strahlen neben der Erwärmung auch die Erd b e w e g u n g beeinflussen, so muß der letztere Einfluß geringer sein als der von den Elektronen, welche die Schattenseite der Erde treffen, damit die Erde um die Sonne noch die Ellipsenbahn beschreibt. Nur würde dann die bisherige Massenbestimmung der Sonne auf Grund der Erdbewegung auf ihrer Bahn um die Sonne als eine unsichere anzusehen sein, indem die Masse als zu klein ermittelt wäre, was übrigens schon seit längerer Zeit vermutet wird. Denn diese Berechnung nimmt an, daß die Gravitation zwischen zwei nichtleuchtenden Massen dieselbe Größe habe wie die zwischen einer leuchtenden und einer nicht leuchtenden unter gleichen Bedingungen. Aber welcher von den beiden Fällen auch vorliegt, die Erde wird von der leuchtenden Sonne ebenso angezogen wie der Mond von der nichtleuchtenden Erde: und man kann schließlich sogar sagen, daß die Erwärmung der Erde durch die Sonnenstrahlen den Grund und das Band bildet, die die Erde an die Sonne ketten.

116 Damit ist das Newtonsche Gravitationsgesetz begründet; dieses sagt nur aus, daß die Anziehung des ersten Körpers durch den zweiten von der Masse des zweiten und dem umgekehrten Quadrat der Entfernung beider Körper abhängt, nicht aber, daß sie auch von der Masse des ersten Körpers abhängig ist. Die falsche Erweiterung, daß die Anziehung dem Produkt beider Massen proportional ist, ist einer der unglücklichsten Gedanken in der Wissenschaft gewesen und muß so schnell wie möglich mit allen daraus gezogenen Folgerungen ausgemerzt werden. Die neue Auffassung der Gravitation gewährt eine unmittelbar einleuchtende Erklärung, die jedem verständlich ist, während das, was bisher darüber gesagt wurde, völlig unzulänglich war. Denn bisher sollte sich die Wirkung z. B. am Apfel zeigen, während als die Ursache die Erdmasse mit dem Massenmittelpunkt als Sitz angesehen wurde; dies ist aber mit unseren Vorstellungen von Ursache und Wirkung nicht zu vereinigen. Nun wirkt die Energie des Überdruckes der Elektronenstöße auf den Apfel und an dem Apfel und treibt ihn zur Erdoberfläche. Ferner wenn ein Körper eine bestimmte Menge kinetischer Energie enthält, so behält er seine Geschwindigkeit unverändert bei. Aber der freifallende Körper, auf den sichtbar keine Energie übertragen wird, vergrößert die seinige beständig. Dies ist auf Grund der dargelegten Vorstellung notwendig; denn je längere Zeit die Elektronenstöße den Apfel zur Erde treiben, um so größer wird die aufgenommene Energie.

Wenn die neue Erklärung auf der von Lenard festgestellten Tatsache der Proportionalität zwischen der Masse und der Absorption der Elektronen fußt, so sind damit jedoch noch nicht die letzten Gründe dieser Proportionalität klargelegt; hier bleibt noch eine Erkenntnislücke, von der man hoffen darf, daß sie dereinst ausgefüllt wird. Aber diese Lücke schwächt die Bedeutung der von Lenard festgestellten Tatsache nicht ab; und auf ihr und der Elektronenenergie baut sich die neue, wohl die erste eigentliche Erklärung

der Gravitation auf; umgekehrt kann auch sie als wertvolle Stütze der Elektronentheorie angesehen werden.

117 Von den verschiedenen Möglichkeiten, diese Erkenntnislücke auszufüllen, mögen zwei erwähnt werden. 1. Die Elektronen haben alle dieselbe Größe und brauchen alle dieselbe Zeit von der Aufnahme in das Atom bis zum Verlassen desselben, während welcher sie Energie abgeben. Die Atome enthalten, wenn sie ganz mit Elektronen angefüllt sind, so viel Elektronen, als ihre Atomgewichtszahl angibt. Dann erfolgt die Wucht der Stöße und ihre Energieabgabe mit einer Größe, die dem Atomgewicht proportional ist. Die wahre Masse der Atome kommt gar nicht in Frage, sie ist ein „Ding an sich", das völlig unabhängig ist von der Wirkung der Elektronen, die allein beobachtet werden kann. Nach dieser Ansicht müßten die Atomgewichte ganze Zahlen sein, was nur angenähert richtig ist. 2. Die Elektronen sind wieder gleich groß; aber die Zeiten, während welcher sie im Atom verharren unter Abgabe von Energie, sind verschieden; und die Zahl der Elektronen, die in einem Atom gleichzeitig vorhanden sein können, fällt mit der Valenzzahl 1 bis 4 der Elemente zusammen. Sind dann die Produkte aus den Valenzzahlen und diesen Zeiten den Atomgewichten proportional, so ist die Energieaufnahme in der Zeiteinheit wieder den Atomgewichten proportional; und gleichzeitig würde ein Weg angebahnt, die rätselhaften Valenzen dem Verständnis näherzubringen. Die zweite Annahme dürfte zunächst vor der anderen den Vorzug erhalten.

118 Es darf hier des Gedankens eines der genialsten Mathematiker, B. Riemann, Erwähnung getan werden, der die der Gravitation zugrunde liegenden Verhältnisse vorausgeahnt hat, ohne jedoch die genügende Erklärung zu liefern, ja, den eigenen Gedanken später selbst verworfen hat. Der Ausgangspunkt seiner Anschauung (Seite 503 seiner gesammelten Werke) bildet die Beobachtung der Seele: „Jedem Akt derselben," sagt er, „liegt etwas Bleibendes zugrunde, welches sich bei besonderen Anlässen (durch die Erinnerung) als solches kundgibt, ohne einen dauernden Einfluß auf die Erscheinungen auszuüben. Von dieser Tatsache geleitet, mache ich die Hypothese, daß der Weltraum mit einem Stoff erfüllt ist, welcher fortwährend in die ponderablen Atome strömt und dort aus der Erscheinungswelt (Körperwelt) verschwindet. In jedes ponderable Atom tritt in jedem Augenblicke eine bestimmte, der Gravitationskraft proportionale Stoffmenge ein und verschwindet dort."

An dieser Vorstellung ist falsch, daß Stoff verschwinden soll; und die Erkenntnis davon wird Riemann bestimmt haben, sie aufzugeben. Ferner ist an ihr unklar, daß der Stoff als solcher eine Kraft oder Energie enthält, aber diese Unklarheit, die im Newtonschen Gravitationsgesetz zutage tritt, teilt er mit seiner ganzen Zeit; er hat diese Sätze um 1850 geschrieben. Schließlich haben Seelentätigkeit und Gravitation keine unmittelbaren Beziehungen zueinander. Die Seelentätigkeit ist eine Funktion des Gehirns, der feinsten Maschine, die es gibt, und die durch die im Blut aufgespeicherte Energie getrieben wird, die Gravitation eine auf alle Massen wirkende Energie; aber hätte Riemann damals statt Masse eine an die Masse geknüpfte Energie gesetzt, welche auf eine andere Masse übertragen wird, während sich die erste Masse mit verminderter Energie entfernt, so würde seine Vorstellung mit der hier vorgetragenen zusammengefallen sein. Bisher ist seine Ansicht nur der Merkwürdigkeit wegen und aus Rücksicht auf seine sonstige überragende Bedeutung unter den Lösungen des Gravitationsproblems aufgeführt worden, aber immer mit dem Hinweis, daß sie am meisten abstehe von dem Wege, auf dem die Wahrheit zu finden sei. Und nun zeigt sich, daß sich die neue Anschauung an die Riemannsche anlehnen kann.

119 Nach den bisherigen Darlegungen empfängt die Erde ständig Elektronenenergie, die die kinetische Energie der Erde vermehrt, die jedoch auch ständig wieder an die an die Erde stoßenden Elektronen abgegeben wird, die aber einen Energiefond freier Energie darstellt, deren Umlagerung unter Überführung in gebundene Energie eine große Reihe von Veränderungen auf der Erde bewirkt.

Zunächst mag darauf hingewiesen werden, daß die kinetische Energie der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne schwankt. Die Abstände der Erde von der Sonne im Perihel und Aphel verhalten sich annähernd wie 197 : 203, demnach ihre Geschwindigkeiten nach dem Flächensatze wie 203 : 197, folglich die translatorischen kinetischen Energien der Erde in diesen Punkten wie $203^2 : 197^2 = 17 : 16$, genauer 29 : 27; also wächst diese Energie beim Wandern der Erde vom Aphel zum Perihel um $^1/_{16}$, was bei der translatorischen Energie der Erde eine gewaltige Größe ist, um auf dem Wege zum Aphel zurück um dieselbe Menge wieder abzunehmen. Woher wird diese Energie genommen und wohin fließt sie zurück? Wie soll diese Zu- und Abnahme auf Grund der Äthervorstellung verständlich gemacht werden? Früher konnte man seine Zuflucht zur potentiellen Energie nehmen, die auf dem Wege zum Perihel auf der Erde aufgespeichert würde, ohne dort irgendwie wirken zu können, und auf dem Wege zum Aphel als kinetische Energie wieder zum Vorschein käme, wie noch jetzt an einzelnen Schulen die Bewegung des Pendels mit Zuhilfenahme der Energie der Lage erklärt wird. Aber es dürfte jetzt wohl keinen ernsthaften Forscher geben, der nicht die Energie der Lage als eine Verlegenheitsannahme ansieht, mit der man etwas Unverständliches verdecken will. Wenn aber die abnehmende kinetische Energie der Erde nicht als potentielle Energie auf ihr bleibt, dann muß ein Agens da sein, das sie aufnimmt. Dies ist das Elektronenmeer, das bei der Sonnennähe mehr Stöße in der Richtung nach der Sonne hin überträgt als bei der Sonnenferne und dadurch auf der Erde Energie aufspeichert, die in der größeren Geschwindigkeit bemerkbar wird. Während der Entfernung der Erde von der Sonne nimmt die aufgespeicherte Energie ab, bis sie im Frühlingspunkte die mittlere Energie erreicht, um bis zum Sommerbeginn auf den kleinsten Wert zu sinken und von da ab wieder zuzunehmen. Man hat die tägliche Ebbe und Flut Atmen des Meeres genannt. In gleicher Weise kann man in bezug auf die Massen des Weltraumes von einem Atmen des Elektronenmeeres sprechen, von einem rhythmischen Wechsel in dem Energie-Zu- und -abfluß von den Elektronen zu den Massen und umgekehrt, worauf die Bewegungen beruhen, die die Planeten an ihre Sonnen ketten.

120 Weiter mögen die rätselhaften Erscheinungen des Radiums besprochen werden. Nach der geltenden wissenschaftlichen Anschauung ist im Radium ein großer Vorrat potentieller Energie aufgespeichert, der im Laufe der Zeiten durch die Ausstrahlung der Radiumemanation vermindert wird, der aber fast unerschöpflich zu sein scheint; und im Anschluß daran macht sich die Ansicht mehr und mehr geltend, daß auch die in anderen Stoffen vorrätige Energie sehr groß ist. Diesen Gedanken kann man auch nur als eine Verlegenheitsansicht bezeichnen, da man mit ihm alles Mögliche erklären, aber nur nicht die eine Frage beantworten kann, warum diese fast unbegrenzte Energie so lange im Radium festgebannt bleibt, anstatt unmittelbar auf die Nachbarträger mit minderer Energie abzufließen. Dieses Bedenken legt die Annahme nahe, daß das Radium mit seiner Umgebung im Energiegleichgewicht steht und daß die Veränderungen in ihm dem Zuflusse kinetischer Energie von außen zu verdanken sind. Nun zerfällt Radium im Laufe der Zeit in Blei und Helium. Von diesen ist Blei bei den Temperaturen der Erdoberfläche ein

fester Körper, Helium ein einatomiges Gas, dessen Atome sich weder mit ihresgleichen noch mit den Atomen anderer Elemente zu Molekeln zusammenlegen. Daher kann Helium auch keinen Anlaß zu einer Verbrennungswärme bieten, deren Abfluß nach anderen Stellen Störungen des Energiegleichgewichts und damit Störungen der gegenseitigen Lage der Atome verursachen kann. Helium kann demnach, wie auch die anderen Edelgase, sich schon bei hohen Temperaturen mit den Atomen anderer Elemente infolge der Gleichheit der Bewegungen zusammenlegen und bei Erniedrigung der Temperatur in diesem Zusammenhange bleiben, vorausgesetzt, daß beide Atomarten, sei es dauernd oder wenigstens in der Nähe der Anlagerungstemperatur, gleiche Schwingungsform haben. Dann schwingen die gekuppelten Atome in Molekeln, obwohl ihre Teile nur mechanisch und nicht chemisch aneinander geknüpft sind, d. h., daß zur Trennung nur die Energie erforderlich ist, die dem Helium die Gasgeschwindigkeit erteilt, nicht aber auch die, welche die Verbindung auf die frühere Verbindungstemperatur, also in den Glühzustand, bringt.

Die Loslösung des Heliumatoms von dem Blei des Radiums schreibe ich nun den Heliumelektronen zu, die im Sonnenraum reichlich vorhanden sind und beim Anprall an die Erde entweder reflektiert werden oder die Erde durchfahren und beim Zusammenstoß mit Helium diese durchdringen und auf sie einen Teil ihrer Energie übertragen. Diese würde als Gravitationsenergie wirken, wenn nicht das Heliumatom bestrebt wäre, sie zu verwenden, damit es in den Gaszustand übergeht. Nun liegen im Radium die Blei- und Heliumatome innig vermischt durcheinander, so daß die vom Blei umschlossenen Heliumatome nicht die freie Bewegung eines Gases erreichen. Daher wird ein Teil der von ihnen aufgefangenen Energie vorübergehend auf die Nachbaratome Blei übertragen, um die einzelnen Radiumbestandteile im Energiegleichgewicht zu erhalten. Nur die am Rande der Radiummasse liegenden Heliumatome, die mit Luft oder Wasser in Berührung kommen, können entweichen und tragen die eigene und die in den benachbarten Bleiatomen lagernde freie Energie fort. So kann das freie Heliumatom eine größere Geschwindigkeit erhalten. Aus dem Innern der Radiummasse werden immer neue Heliumatome nach der Oberfläche rücken, um den dort gestörten Gleichgewichtszustand der Verteilung wieder herzustellen; und immer neue Heliumatome werden fortgeschleudert, deren Menge der noch vorhandenen Heliummenge proportional sein muß. Daraus wird verständlich, daß die Umwandlung des Radiums in Blei durch Abgabe sämtlicher Heliumatome sehr lange Zeit in Anspruch nehmen kann. Aber der Grund dafür ist nicht ein von Anfang an vorhandener ungeheurer Vorrat von Energie im festen Radium, dessen Festigkeit auf einem Energiemangel beruht, sondern die dauernde Zufuhr von Energie, die von den Heliumelektronen des Weltalls geleistet wird.

121 Die Hauptveränderungen durch die der Erde zugeführten Elektronenenergie bestehen in der Auffüllung von vorher veranlaßtem Energiemangel, so bei der Herstellung des höheren Aggregatzustandes aus dem niedrigeren, des flüssigen aus dem festen bis hinauf zu dem reinen Atomzustande. Die Bildung der Lösungen aus Salz und Lösungsmittel fallen nicht hierher, da diese von selbst vor sich geht, indem dabei freie Energie entwickelt wird. Zur Umwandlung fester Körper in flüssige ohne Lösungsmittel gehört meist eine bedeutende Konzentration von Energie, die in der Natur infolge der leichten Zerstreuung freier Energie nur selten erzielt wird. Aber daß sie möglich ist, ergibt sich aus den Schmelzversuchen mit Hilfe von durch Brenngläser konzentrierter Sonnenenergie und ohne dieses Mittel im Schmelzen des Eises.

Daß auch die Verwandlung des flüssigen in den Gaszustand der Elektronenenergie in weitem Umfange obliegt, zeigt die Verdunstung des Wassers auf der Erde. Besonders wichtig ist die Auffüllung mit Energie, die die chemischen Verbindungen rückgängig macht oder, genauer gesagt, die Molekeln in Atome zerspaltet. Von dieser Eigenschaft wird in den Cl- und Br-Verbindungen in der Photographie ausgiebiger Gebrauch gemacht. Die wichtigste Beseitigung dieses Energiemangels vollzieht sich in den Blättern der Bäume, wo das Gas CO_2 in die Atome C und O zerlegt wird, und zwar in dem Chlorophyll der Blätter. Man kann diesem die Fähigkeit zuschreiben, unter dem Einfluß der Sonnenstrahlen die Molekeln CO_2 so einzustellen, daß die um C rotierenden Atome O sich in einer Ebene, senkrecht zur Richtung der Sonnenstrahlen bewegen und zwar in derselben Richtung wie die Drehwucht der Elektronen. Dann wird ein Teil dieser Drehwucht auf die O-Atome übertragen, bis diese sich schließlich frei bewegen können. Es ist dabei nicht notwendig, daß diese Atome so stark mit Energie beladen werden, daß sie einzeln als isolierte Atome wegfliegen. Es genügt vielleicht, daß eines der beiden O von einem Elektron getroffen wird und dadurch eine Beschleunigung erhält, die es mit dem anderen rotierenden O zusammenlagert, wodurch O_2 mit doppelter Energie entsteht, so daß nicht mehr viel Energie erforderlich ist, um O_2 vollständig zu isolieren. Es bleibt dann noch übrig, eine Hypothese zu bilden, wie das isolierte C-Atom mit H_2O Formaldehyd HCOH aufbaut.

122 Bisher hat man diese Erscheinungen nicht auf die Zufuhr kinetischer Energie zurückgeführt, sondern ist durch die Annahme potentieller Energie einer mechanischen Erklärung ausgewichen; an die Stelle der Energie der Sonnenstrahlen, deren Natur unbestimmt blieb, trete in den getrennten Teilen C und O_2 potentielle Energie auf, die bei der Verbrennung wieder frei werde. Nach meiner Auffassung hat die Elektronenenergie einen Energiemangel, der in CO_2 steckt, aufgehoben, aber keine verborgene Energie, weder in C noch in O_2, bei der Zerspaltung aufgespeichert, die bei der Verbrennung wieder zum Vorschein kommen könnte. Nun hat CO_2 dieselbe Längswucht wie O_2; und ihre Drehwuchten werden auch kaum voneinander verschieden sein. Dann ist die kinetische Energie in CO_2 nur um die kinetische Energie von C im festen Zustande größer als die von O_2; also haben C und O_2 zusammen dieselbe Energie wie CO_2. Woher kommt dann die Verbrennungswärme von 100 000 Kal. für 1 Mol CO_2? Wie kann man das Bedürfnis nach einer annehmbaren Erklärung für sie befriedigen?

Nun könnte man in d e r Richtung eine Vorstellung ausbilden, daß in dem Bestandteile der festen Kohle die bei der Verbrennung abgegebene Wärme, wenn auch nicht als freie, so doch als gebundene Energie enthalten sei. Man könnte annehmen, daß die Atome der festen Kohle in kleinere Teile zerfielen und daß diese sich bei der Bildung von CO_2 wieder zu ganzen Atomen zusammenschlössen. Dann würde jeder dieser kleineren, aber selbständigen Teile die Durchschnittsenergie einer Luftmolekel haben, da nur dann das Temperaturgleichgewicht bestehen könnte. Bei der Zusammenlagerung zu Atomen, die mit der chemischen Verbindung einherzugehen hätte, würde der größte Teil dieser Energie frei; und dieser Teil machte die Verbrennungswärme aus. Mit dieser Vorstellung ist allerdings die Tatsache schwer zu vereinigen, daß gerade die Atomwärme von C bei normaler Temperatur kleiner ist als die durchschnittliche der meisten anderen Elemente, so daß man eher vermuten sollte, daß sich im festen Zustande mehrere Atome C zusammenballen, als daß sie sich weiter zerspalten. Außerdem ist darauf aufmerksam zu machen, daß die Verbrennungswärme von CO weit

geringer ist als die von CO_2, daß aber beide nahe gleich sein müßten, wenn sie im wesentlichen ihren Ursprung der Zusammenlagerung von Atomteilen zu Atomen verdankte.

Noch schwieriger würde zu begreifen sein, daß 2 Liter HCl, die aus je 1 Liter H_2 und 1 Liter Cl_2 gebildet sind, bei welchem Vorgang Wärme abgegeben wird, weniger Energie enthalten sollen als die einfachen Gase, aus denen sie entstanden sind. Denn die Durchschnittsenergie der fortschreitenden Bewegung ist nach erfolgter Abkühlung des Gases HCl ebensogroß wie die der einfachen Gase vor der chemischen Einwirkung. Und es ist kein Grund bekannt, weshalb die Drehwuchten verschieden sein sollten, und zwar so verschieden, daß dadurch die positive Verbindungswärme erklärt werden könnte.

123 Dann bleibt aber eine erhebliche Schwierigkeit zu lösen übrig, die eigentliche Verbrennungswärme zu erklären, nicht diejenige, welche bei der Entstehung von Molekeln aus Atomen abgegeben wird und den Energiemangel des Molekularzustandes bedingt, sondern auch diejenige, welche bei der Entstehung von Molekeln einer Verbindung aus den Molekeln der einfachen Elemente oder aus den Molekeln anderer Verbindungen abgegeben wird. Dieser Vorgang vollzieht sich derart, daß die Molekeln der einfachen Elemente an irgendeinem Punkte durch Energiezuführung in den Atomzustand übergeführt werden und daß sie unter Austausch der Atome neue Molekeln bilden, die natürlich die zugeführte Energie wieder abgeben. Es ist dann zu erklären, weshalb sie außerdem noch mehr Wärme abgeben und woher sie diese Wärme nehmen. Da diese Wärme als kinetische Energie nicht in ihnen enthalten war, so muß sie wieder von außen kommen; und es liegt nahe, für sie dieselbe Quelle in Anspruch zu nehmen, aus der die Zersetzung von CO_2 in C und O_2 zu erklären ist. Ich nehme daher an, daß die eigentliche Verbrennungswärme aus der Elektronenenergie geliefert wird. Daß der Vorrat freier Energie des Elektronenmeeres ausreichend ist, die gewaltigsten Brände der Erde zu speisen, braucht wohl nicht besonders hervorgehoben zu werden. Und ebenso einleuchtend ist es, daß man die Energieabnahme dieses Elektronenmeeres in der unmittelbaren Nähe der Brandstätte schwer nachweisen kann, da die Abnahme in verschwindend kurzer Zeit wieder ausgeglichen wird durch den Zufluß aus der unverminderten Energie der Nachbarräume. Jedenfalls müßten die diesem Zwecke dienenden Apparate äußerst feine sein.

Meine Annahme wird manchem ungeheuerlich und vielen unwissenschaftlich erscheinen, obwohl sie mit keinem Grundsatz des Naturgeschehens in Widerspruch steht, ja mit demjenigen im Grunde übereinstimmt, der die Zerspaltung von CO_2 in C und O_2 erklärt. Aber sie hat den einen Fehler, neu zu sein, und beansprucht daher Zeit, daß man sich an sie gewöhnt. Vielleicht wird man ihr auch den Vorwurf machen, daß sie sich dem Nachweis ihrer Richtigkeit oder Unrichtigkeit entziehe und demnach die aufgeworfene Frage eher von der Untersuchung fernhalte, als sie ihr unterwerfe. Sollte dieser Vorwurf berechtigt sein, so gilt er in demselben und in noch weit größerem Maße gegenüber dem Begriff der potentiellen Energie; denn diese ist vorstellungslos, während die Elektronenenergie unserer Vorstellung zugängig ist. Daher kann man aus ihr auch Folgerungen ziehen, die mit der Wirklichkeit verglichen werden können. So ist die Übertragung der Elektronenenergie mit Zeit verknüpft; und es kann nach Vorgängen gesucht werden, bei denen die zur Anwendung kommende Energie so groß ist, daß die Zeit, die zur Wirkung erforderlich ist, aus dem unmeßbar Kleinen in das Meßbare übergeht.

Einen solchen Energieverbrauch findet man in unseren modernen Geschützen: wenn nun die bei der Verbrennung des Pulvers gewonnene Energie nicht in dem Pulver latent enthalten gewesen ist, wenn sie also von außen hinzugetreten ist, so muß sie von den Elektronen durch die Wandungen des Geschützes auf das Pulver übertragen sein. Dann wird eine größere Pulvermenge unter sonst gleichen Umständen eine größere Zeit zur Verbrennung erfordern. Die Pulvergase wirken aber auf das Geschoß nur so lange, als das Geschoß im Lauf bleibt. Ist nun die Pulvermenge so groß, daß sie in der kurzen Zeit, die die Kugel im Laufe bleibt, nicht vollständig verbrennt, sondern der Rest erst später, so kann dieser Rest zur Geschwindigkeit der Kugel nichts beitragen. Es ist dann eine bestimmte Ladung erforderlich, um der Kugel das Maximum der Geschwindigkeit zu geben. Ein weiterer Zuwachs an Ladung vergrößert die Geschwindigkeit nicht; und wenn er auch der Kanone nicht schadet, so ist er doch unnütz. Versuche mit Kanonen können nun entscheiden, ob die Vergrößerung der Ladung von einem bestimmten Punkte ab die Geschwindigkeit der Kugel beim Verlassen des Laufes nicht mehr steigert oder ob die Vermehrung der Ladung die Geschwindigkeit ständig vergrößert. Der erste Befund würde zugunsten meiner Anschauung sprechen, der zweite noch nicht unmittelbar dagegen. Denn es kann sein, daß die Zeit des Zuströmens einer ausreichenden Elektronenmenge noch kleiner ist als die Zeit, während welcher die Kugel im Laufe bleibt.

124 Nun darf man sich aber nicht allein mit der Beantwortung der Frage begnügen, woher die Verbrennungsenergie bezogen wird, sondern muß weiter fragen, welchem Zwecke diese Energieübertragung dient. Es ist zu vermuten, daß sie der Ausdruck einer Arbeitsleistung ist. Aber welche Arbeitsleistung kann man von den Elektronen erwarten?

Wir haben die Annahme gemacht, daß die Atome eines Elements bei normaler Temperatur nur Elektronen in sich aufnehmen und durchlassen, die von den Atomen desselben Elementes ausgehen. Es ist dabei nicht notwendig, daß in jedem Augenblicke dieselbe Anzahl von Elektronen in einem Atom ist; es ist nur notwendig, daß das Atom eine bestimmte Anzahl Bahnen, etwa 1 bis 4 besitzt, auf denen Elektronen hindurchgehen können; dann werden auf diesen Bahnen nach der Wahrscheinlichkeit in einer Sekunde gleich viel Elektronen gehen; aber es ist möglich, daß in einem gegebenen Zeitmoment gar keine Elektronen passieren, in einem andern alle Bahnen besetzt sind und darüber hinaus keine hindurch gehen können. Beim Passieren verlieren sie einen bestimmten Teil ihrer Geschwindigkeit, und das ist die Quelle der Gravitationsenergie. Wir haben dann weiter angenommen, daß im Glühzustand alle Elektronen, die in den Bereich des Atoms kommen, von ihm aufgenommen werden. Dann sind in der Zeit einer Sekunde mehr Elektronen durch das Atom gegangen; es kann daher über die Gravitationsenergie hinaus noch mehr Energie aufgenommen werden; und es muß dies geschehen, wenn damit eine Arbeit geleistet werden kann. Daher ist der Glühzustand besonders geeignet, Energie zu verlagern.

Damit nun die Elektronen sowohl im Glühzustand wie im Nichtglühzustand eine glatte Bahn vorfinden, müssen die Schwingungen der aneinanderhaftenden Atome so verlaufen, daß die Wege des Durchgangs der Elektronen durch die Atome frei bleiben. Bei der Bildung der Molekeln der einfachen Elemente aus den Einzelatomen bei Glühtemperatur ist die gegenseitige Lage der Atome notwendigerweise so bestimmt worden, daß die Elektronen ihren Durchgang durch sie möglichst leicht finden: es ist dies eine Grundbedingung der Molekelbildung, da von ihnen sonst kraft ihrer gewaltigen Energie die Atome auseinandergetrieben würden. Sind aber im

Glühzustand die Atome verschiedener Elemente durcheinander gemischt, so legen sich diese auch aneinander aus demselben Grunde wie die Atome desselben Elements, nämlich aus der Gleichheit der Bewegungszustände. Aber da die Atome verschiedener Elemente verschiedene Schwingungszustände haben, so ist zu erwarten, daß sie bei der Aneinanderlagerung auf Grund gleicher Bewegungen dem Durchgang der Elektronen einen größeren Widerstand entgegensetzen, und daß die Elektronen eine bestimmte einmalige Arbeit leisten müssen, um den glatten Durchgang zu ermöglichen; d. h. die Atome so zu verlagern, daß von da ab der Durchgang leicht stattfindet. Die übertragene Energie bleibt als Wärme an den Molekeln haften, während die Elektronen enteilen. Die so aufgespeicherte Energie ist nach meiner Ansicht die Verbrennungswärme.

125 Diese Vorstellung wird mancher allzu kühn finden und sie aus diesem Grunde ablehnen, ohne auch nur den Versuch zu einer Kritik zu machen. Immerhin ist auch mit der Möglichkeit zu rechnen, daß die Wissenschaft überzeugende Gründe bringt, um sie als irrig hinzustellen; bis dahin kann sie aber als Gährungskeim dienen für die Neubildung wissenschaftlicher Vorstellungen und auf diese Weise fördernd wirken. Zunächst liegt für mich die Bedeutung dieser Darlegung nicht darin, daß diese Vorstellung eine für die Wissenschaft notwendige, sondern nur als eine für sie mögliche hingestellt wird; und dies hat den Zweck, den letzten Schlupfwinkel, den die potentielle Energie in der Verbrennungswärme findet, aufzusuchen und daraus zu vertreiben. Jedenfalls kann nun nicht mehr behauptet werden, daß die Verbrennungswärme notwendig die potentielle Energie als Erklärungsgrund haben muß.

Diese Vorstellung ist aber durchaus nicht so ablehnungswert, wie sie dem erscheint, der in dem bisherigen Denken festgebannt ist. Sie gibt überhaupt die erste Erklärungsmöglichkeit der Verbrennungswärme. Bisher hat man sich mit der Feststellung der Tatsachen begnügen müssen; man hat die verschiedene Größe derselben bei den verschiedenen chemischen Verbindungen festgestellt und nachgewiesen, daß diese Wärme der Menge der entstandenen Verbindung proportional ist. Dabei ist man aber über die Schwierigkeit hinweggeglitten, daß die potentielle Energie bei der Bildung des Wassers in den Komponenten O und H liegen soll, während die Verbrennungswärme nicht von der Menge des beim Versuche benutzten H und O abhängig ist, sondern von der Menge des gebildeten H_2O. Wenn eine Mischung von 2 Liter H und 2 Liter O durch den elektrischen Funken entzündet wird, so wird ein Liter H_2O gebildet und 1 Liter O bleibt zurück. Warum ist bei dieser energischen Reaktion nicht die potentielle Energie des restlichen Liters O mit in die Verbrennungswärme eingetreten? Während die bisherige Auffassung versagt, erklärt die neue die Tatsache als selbstverständlich, da die geleistete Verbrennungsarbeit der Menge des entstandenen Körpers proportional sein muß. Sie bringt auch physikalische Tatsachen der Einsicht nahe, so z. B. die außerordentlich beständige Lagerung der Atome in den Kristallen. Diese kann zwar allein auf den Mangel an kinetischer Energie zurückgeführt werden, deren Zuführung im ganzen erst den festen Zustand wieder aufhebt. Aber es sind doch immer von außen an einzelnen Stellen Energien wirksam, die an einem Punkte eine Umlagerung hervorrufen könnten, wie es ja in nicht kristallinischen Körpern wie Glas tatsächlich der Fall ist. Aber warum wirken die Energien in den Kristallen nicht? Weil eine Umlagerung der Atome in ihnen den Durchgang der Elektronen erschweren würden und diese daher der Umlagerung entgegenwirken. Dann halten ganz allgemein die Elektronen den Zustand in den festen Kör-

pern aufrecht; und sie sind ebenso sehr als die Erhalter des Weltbestehens anzusehen wie als die Ursache des Weltgeschehens.

Eine solche Auffassung der Vorgänge hat mit manchen früheren Anschauungen Berührungspunkte und kann diese in eine neue Beleuchtung stellen. So mag Leibnitz in seiner prästabilisierten Harmonie das zu begründen versucht haben, was ihm als Physiker ahnungsvoll vorgeschwebt hat, das Beherrschtsein der Welt durch ein Agens, als welches ich hier die Elektronen in Anspruch genommen habe. Auch Alexander v. Humboldts Bestreben, die Welt als einen Kosmos darzustellen, als ein nach festen Linien Geordnetes, fällt in dieselbe Richtung: und schließlich dürfte diese Gedankenentwicklung, die die Erhaltung der Welt, also die Abwehr des Chaos der Tätigkeit der Elektronen zuschreibt, von vielen Seiten, auch von Philosophen, freundlich aufgenommen und gern weiter verfolgt werden.

126 Die wahren Vorgänge in der Natur sind unserem Einblick mehr oder minder verschlossen; wir stellen uns dieselben in Bildern vor, die ihnen nahe kommen mögen. Das Ziel der Wissenschaft ist, die Bilder so zu formen, daß sie möglichst viele Erscheinungen unter einem gemeinsamen Gesichtspunkte unserem Verständnis nahe bringen, und gleichzeitig zu erreichen, daß die Bilder mit unseren allgemeinen Vorstellungen nicht in Widerspruch stehen. Ich glaube, gezeigt zu haben, daß die bisherigen Vorstellungen von osmotischer und elektrischer Kraft, von Kohäsions- und Affinitätskräften nicht haltbar sind, ebenso, daß die Wissenschaft weder mit dem Begriff der potentiellen Energie noch mit der verschwommenen Äthervorstellung weiterarbeiten kann. Ich habe versucht, dafür ein anderes zu geben. Ob dies ein besseres ist, muß die Kritik erweisen. Dies vorausgeschickt, betrachte ich meine Darlegungen als die folgerichtige Fortsetzung der Gedankenarbeit von Robert Meyer und Clausius, die nach einer glänzenden Entwicklung in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts zum Stillstand gekommen ist und unter dem führenden Einfluß von Thomson und Helmholtz in das vom Ziel abführende Fahrwasser der letzten wissenschaftlichen Entwicklung geführt hat.

9. Abschnitt.

Einsteins Relativitätstheorie.

127 Den ersten Anlaß zur Relativitätstheorie hat der bekannte Michelsonsche Versuch gegeben. Dieser besteht im Wesentlichen darin, ein Lichtbündel in zwei Teilbündel zu zerlegen, die gleich lange, aber verschieden gerichtete Wege auf der Erde beschreiben, um dann wieder vereinigt zu werden. Wenn die Erde sich nicht um die Sonne mit 30 km Geschwindigkeit bewegte, sonder sozusagen still stünde, so würden die beiden Bündel nach der Wiedervereinigung in gleichem Schwingungszustande sein und demnach keine Interferenzerscheinungen hervorrufen. Das eine Bündel bewegt sich in der Ost-West-Richtung, das andere in der Nord-Süd-Richtung hin und her. Auf Grund einer angestellten Rechnung folgert Michelson, daß die West-Ost-Bewegung der Erde um die Sonne die Lichtstrahlenbündel so beeinflusse, daß ein Gangunterschied beider Strahlengruppen auftreten müsse, der Interferenzerscheinungen bedinge. Der Versuch hat aber diese Erscheinungen nicht gezeigt; und deren A u s b l e i b e n war zu erklären.

Die Bewegung der Erde um die Sonne ist in jedem Augenblicke eine translatorische: nun gilt das Gesetz der geometrischen Zusammensetzung der Geschwindigkeiten sowohl in einem festen wie in einem translatorisch be-

wegten System; demnach muß aus diesem Grunde beim Michelsonschen Versuch die Interferenzerscheinung ausbleiben; und der Veranstalter des Versuches hätte von dem Ergebnisse des Versuches voll befriedigt sein und in seiner Rechnung einen Fehler vermuten müssen. Aber er war es nicht, da er in der Rechnung keinen Fehler finden konnte. Nun liegt seiner Rechnung die Voraussetzung zugrunde, daß die Lichtgeschwindigkeit absolut konstant ist, daß also die Bewegung der Erde, mit der das Licht zusammenstößt, dessen Geschwindigkeit nicht beeinflußt. Seine Voraussetzung schränkt also das bisher allgemein geltende Gesetz der geometrischen Zusammensetzung der Geschwindigkeiten für das Licht ein, um einen einzigen Versuch zu erklären. Daß demnach die Annahme der absoluten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit mit dem genannten allgemeinen Gesetze in Widerspruch steht, ergibt sich aus dieser Darlegung, wird aber von Michelson und seinen Anhängern übersehen. Würden sie dieses Gesetz noch für allgemein gültig ansehen, so böte der Ausgang des Versuches keinen Anstoß. Statt diesen naheliegenden Weg zu gehen, haben sie nach einer anderen Erklärung gesucht.

Von diesen Erklärungsversuchen hat die Einsteinsche Relativitätstheorie als der umfassendste Versuch eines neuen Weges die größte Aufmerksamkeit erregt; und es hat eine Zeit gegeben, wo fast täglich in den Zeitungen der Name Einstein genannt und jede Kleinigkeit über sein Tun und Lassen der Gesamtmenschheit mitgeteilt wurde. Es wurde von Anfang an zugegeben, daß seine Lehre schwer zu fassen sei, und daß nur die Auserwählten imstande seien, dem Fluge seiner Gedanken zu folgen. Wer daher seine Lehre nicht begreifen konnte — und das sind die meisten Ehrlichen unter seinen Zuhörern gewesen —, mußte sich zu den beschränkten Köpfen rechnen lassen, die noch nicht reif waren für die kommende Ära der Wissenschaft, deren Morgenrot Einstein verkündete. Ich selbst habe in Hamburg einen Vortrag von ihm gehört und aus demselben nichts im Gedächtnis behalten außer dem, allerdings falschen Satz, daß zwei gerade Linien, wenn sie dieselbe Richtung haben, zusammenfallen müssen. Zum Glück ist er nicht richtig; sonst müßten je zwei Eisenbahnzüge auf parallel laufenden Schienenwegen, wenn sie in entgegengesetzter Richtung fahren, zusammenstoßen.

Worin besteht nun die Schwierigkeit des Verständnisses? Darin, daß der Lehre keine anschauliche Vorstellung zugrunde liegt, auf der sie sich aufbaut, sondern eine Rechnung, deren Formeln eine physikalische Deutung erhalten sollen. Als Kopernikus seine Lehre von der Drehung der Erde um ihre Achse und von ihrer Kreisbahn um die Sonne aufstellte, da standen ihm für die Erddrehung, obwohl sie von den Menschen nicht empfunden wurde, Analogien von Sinnestäuschungen zur Verfügung, die entstehen, wenn ein Wagen schnell an Bäumen vorbeifährt, so daß diese sich in entgegengesetzter Richtung zu bewegen scheinen, oder daß auf einem schwankenden Schiff der Beobachter glaubt, daß sich die Ufer heben und senken. Und wenn Robert Mayer die Wärme als die Bewegung der kleinsten Teilchen, Atome und Molekeln erklärte, so lag eine anschauliche Vorstellung zugrunde, auf der sich die Wärmelehre aufbaute: überall, wo sie nicht verlassen wurde, war die Erklärung überzeugend; und erst bei der potentiellen Energie, wo sie verlassen wurde, begann die Unwissenschaftlichkeit.

128 Die Annahme, daß die Lichtgeschwindigkeit absolut konstant ist, ist eine Hypothese, die auch bei Einstein nicht für jede Lichtgeschwindigkeit als gültig angesehen wird. Denn Licht, das durch oder zwischen Massen hindurchgegangen ist, verliert an Geschwindigkeit; daher ist die Annahme auf die Vakuumlichtgeschwindigkeit beschränkt worden. Aber dieses Licht

gelangt gar nicht zu uns, sondern nur solches, das unser Auge getroffen hat; und dieses letztere bewegt sich mit der Erde und mit deren Geschwindigkeit von 30 km fort. Wenn daher auch das Vakuumlicht konstante Geschwindigkeit haben sollte — und nach meinen Vorstellungen wird die Lichtgeschwindigkeit, wenn sie auch durch den Einfluß der Massen und deren Bewegungen sich nach oben und unten um kleine Beträge ändert, doch immer wieder demselben Mittelwert zustreben —, so ist die Geschwindigkeit des in unser Auge tretenden Lichtes deshalb doch nicht konstant.

Als nächste Frage drängt sich hier die auf, ob nicht ein, auch Einstein bekannter Versuch vorliegt, der die Veränderung der Lichtgeschwindigkeit unter dem Einflusse bewegter Massen nachweist. Ein solcher ist derjenige von Fizeau, dessen Ergebnis Einstein durch die Formel: $V = Vo + v\ (1 - \frac{1}{n^2})$ zum Ausdruck bringt. (Siehe seine Darlegung der Relativitätstheorie, „Kultur der Gegenwart“, Bd. Physik.) Er erläutert sie dahin, daß Vo die Vakuumlichtgeschwindigkeit, v die Geschwindigkeit des Wassers ist, das durch eine Röhre in der Richtung des durchgehenden Lichtes gepreßt wurde, n den Brechungsexponenten beim Übergang aus Luft in Wasser und V die resultierende Geschwindigkeit bedeutet. Dann sagt die Formel aus, daß V größer als Vo werden, also die Vakuumlichtgeschwindigkeit überschreiten kann und zwar um einen Betrag, der v proportional ist. Nun zieht Einstein aus dieser Formel nur den Schluß, daß v nicht ganz, sondern nur mit einem Teile, z. B. für $n = \frac{4}{3}$ mit $\frac{7}{16}$ v auf Vo übertragen werde und will dadurch die Aufmerksamkeit von dem wirklichen Zuwachse ablenken, den er mit seiner Behauptung der Konstanz ganz bestreitet. Es ist grade so, wie wenn jemand von einem Freunde 100 Mark als Geschenk erwartet und erklärt, nichts erhalten zu haben, weil ihm nicht ganz die Hälfte zugeflossen ist. Daß v auf Vo ganz übertragen werde, ist gar nicht zu erwarten. Ein schnell fahrendes Automobil, das auf einen in derselben Richtung fahrenden Lastwagen stößt, wird auch nicht seine ganze Geschwindigkeit auf diesen übertragen.

Nun ist aber die Formel gar nicht von Fizeau. In seinen Schriften findet sie sich nicht; in seinen Versuchen haben V und Vo eine andere Bedeutung. Vo ist die Geschwindigkeit des Lichtes, das durch eine Röhre mit ruhendem Wasser, V diejenige des Lichtes, das durch eine gleich lange Röhre mit fließendem Wasser geht. Da das Licht in beiden Röhren durch Wasser gegangen ist, kann seine Geschwindigkeit überhaupt nicht vermehrt, sondern nur vermindert werden, aber in der Röhre mit ruhendem Wasser mehr als in der anderen; und demnach muß das Licht aus der letzteren Röhre dem aus der ersteren vorauseilen, was dadurch zur Erscheinung gebracht wird, daß man beide Strahlenbündel auf einen um eine vertikale Achse schnell rotierenden Spiegel fallen läßt. Dann erscheint die weniger verminderte Geschwindigkeit des Lichtes in der zweiten Röhre als beschleunigt. Aber aus dem Versuche folgt, daß die Lichtgeschwindigkeit durch die Bewegung von Materie auch verändert und durch die Bewegung als solche vergrößert werden kann: und damit ist die absolute Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht zu vereinigen.

Auch der Faktor $(1 - \frac{1}{n^2})$, mit dem v verknüpft ist, wird bei Fizeau nicht angetroffen. Ich halte ihn nicht für richtig; denn er muß für $n = 1$ Null werden. Nun ist n für Luft in Luft $= 1$. Wenn man daher in den Röhren statt Wasser Luft nähme und durch die zweite Röhre Luft preßte, so müßte nach der Formel $V = Vo$ werden, während der allgemeine Befund von

Fizeaus Versuchen einen Geschwindigkeitszuwachs für V voraussehen würde. Es liegt nahe, diesen Punkt durch einen einfachen Versuch aufzuklären. Gleichzeitig möchte ich auf einen zweiten Versuch hinweisen, der sich vom Fizeauschen Versuche nur durch eine Änderung in der Länge der beiden gleichen Wasserröhren unterscheidet. Bei doppelter und dreifacher Länge muß die Vorauseilung des Lichtes in der zweiten Röhre nach meiner Ansicht größer werden, während die herrschende Lichttheorie eine solche nicht voraussieht. Ich schließe die Besprechung von Fizeaus Formel mit dem Hinweise, daß die Behandlung derselben durch Einstein nicht diejenige Vorsicht und Gewissenhaftigkeit zeigt, die man von einem Manne erwartet, der die Wissenschaft auf neuen Bahnen weiterführen will.

29 Ich gehe nun zu den Formeln über, aus denen Einstein seine neue Vorstellung ableitet. Er gewinnt sie dadurch, daß er die Bedingungen festlegt, unter denen jeder Lichtstrahl mit der konstanten Geschwindigkeit $c = 300\,000$ km in zwei Koordinatensystemen K und K' sich ausbreitet, wenn sich K' in K längs der X-Achse ohne Drehung mit der Geschwindigkeit v fortschiebt. Nach meiner Ansicht hat ein Lichtstrahl, der von einem Punkte von K' in der Richtung der X-Achse fortgeht, die Geschwindigkeit $c + v$, während er in K die Geschwindigkeit c hat.

Die Formeln sind: $x' = \frac{x - v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, die Formeln der alten Mechanik $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$.

Die vierte Einsteinsche Formel sagt, daß t' von t verschieden ist, während bisher der Satz galt, daß die Zeitdauer eines Ereignisses unabhängig davon ist, ob es auf einem ruhenden oder bewegten Körper verläuft. Jedes Ereignis wird durch die Verlagerung von Energie bedingt und dauert so lange, bis das gestörte Energiegleichgewicht wiederhergestellt ist. Einsteins Formel verlangt aber, daß die Zeitdauer des Ereignisses nicht allein von der Zeit dieser Verlagerung abhängt, sondern von dem Nebenumstand, ob das Ereignis auf einem in Bewegung begriffenen oder in Ruhe befindlichen System erfolgt, obwohl die Ruhe oder Bewegung des Systems mit der Verlagerung der das Ereignis bestimmenden Energie nichts zu tun hat.

Um seine eigenen Worte zu gebrauchen, folgert er (S. 711 der angeführten Schrift), „daß die Gleichheit der Zeitwerte (Gleichzeitigkeit) zweier Ereignisse in bezug auf K die Gleichheit der Zeitwerte (Gleichzeitigkeit der nämlichen Ereignisse) in bezug auf K' im allgemeinen nicht zur Folge hat, und daß also die absolute Bedeutung der Gleichzeitigkeit verloren geht“. Dabei ist unter Gleichzeitigkeit die gleiche Zeitdauer ($t' = t$) zu verstehen, nicht aber der gleiche Zeitpunkt des Beginnes der Beobachtung in den Nullpunkten von K und K'. Er folgert ferner (S. 712), „daß eine mit der Geschwindigkeit v wandernde Uhr, von einem nicht bewegten System aus beurteilt, langsamer geht, als dieselbe Uhr, falls sie nicht wandert“. Bei diesem letzten Satze ist zu bemerken, daß er sich selbst nicht an seine eigene Formel hält; denn in dieser bedeutet v eine Geschwindigkeit in der X-Achse, während das v seiner wandernden Uhr eine ganz beliebige Richtung hat.

30 Wir haben nun zu prüfen, zu welchen Folgerungen er seine Formeln heranzieht. Da ist zunächst zu bemerken, daß t' immer kleiner sein soll als t. Dies ist aber nur möglich, wenn die Größen v und x beide absolut genommen werden. Würde v oder x negativ werden, welcher Fall eintritt, wenn x und v entgegengesetzte Richtung haben, so würde der Zähler

der rechten Seite von t′ größer als t werden, und da der Nenner immer ein echter Bruch ist, müßte t′ > t werden. Durch diese einschränkende Annahme in bezug auf v und x engt er seine eigene Beweglichkeit in der Deutung seiner Formeln stark ein.

Nun soll eine Uhr am Äquator, vom Pole aus gesehen, langsamer gehen als dieselbe Uhr, falls sie nicht mit der Rotationsgeschwindigkeit des Äquatorpunktes wandert. Oder, etwas genauer gesagt, wenn zwei genau gleichgehende Uhren, die eine am Pol, die andere am Äquator aufgestellt sind und der Beobachter am Pol, der beide Uhren übersehen kann, den Gang der Uhren überwacht, so muß er feststellen, daß die Äquatoruhr gegen die Poluhr nachgeht. Nun gilt aber seine Formel 4 nur, wenn die Verschiebung in der X-Achse, der Richtung der Lichtbewegung, vor sich geht. Die X-Achse erstreckt sich aber in diesem Fall vom Pol zum Äquator; der Äquatorpunkt, an dem sich die Uhr befindet, bewegt sich aber senkrecht zur X-Achse; demnach ist das v in dieser Richtung = o und t′ = t nach seiner eigenen Formel. Einstein hat demnach einen falschen Schluß gezogen, während der richtige mit dem Befund der klassischen Mechanik übereinstimmt. Sein Fehler liegt darin, daß er v als absolut betrachtet hat, wo er es als relativ, nämlich in bezug auf die Richtung des Lichtstrahls ansehen mußte. Dieser Fehlschuß ist aber immerhin auffällig bei einem Forscher, der eine Relativitätstheorie aufstellt. Nach der klassischen Mechanik beansprucht jede Lichtnachricht vom Äquator zum Pol, wenn sie direkt möglich wäre, ungefähr $^1/_{30}$ Sekunde. Wenn nun jede Verschiebung des Sekundenzeigers der Äquatoruhr $^1/_{30}$ Sekunde später am Pol gemeldet wird, muß die Polaruhr, die nach der Äquatoruhr genau gestellt ist, um $^1/_{30}$ Sekunde scheinbar gegen die am Pol betrachtete Äquatoruhr vorgehen, muß aber nach der notwendigen Zeitkorrektur als mit ihr gleichgehend festgestellt werden. Die Sekundendauer, die eigentliche Gleichzeitigkeit, ist aber auf beiden Uhren ohne jede Korrektur gleich.

Einen weiteren Gedankenfehler macht Einstein bei seinem Schluß über den Gang der beiden Uhren noch dadurch, daß er die Uhrzeit allein durch die Drehung der Erde um ihre Achse bedingt hält, und daß er glaubt, von der Bewegung der Erde um die Sonne absehen zu dürfen. Auf dem Boden seiner neuen Vorstellung stehend, mußte er sich fragen, ob der Äquatorpunkt immer dieselbe Geschwindigkeit habe, bezogen auf ein Koordinatensystem, dessen XY-Ebene die Erdbahnebene ist. Relativ zur Sonne ist das nicht der Fall. Denn Rotationsgeschwindigkeit und Translationsgeschwindigkeit der Erde haben um Mitternacht dieselbe, um Mittag entgegengesetzte Richtung; und die Resultierende ist am Äquator das eine Mal $30^1/_2$, das andere Mal $29^1/_2$ km; und ein jeder Punkt auf der Schattenseite hat eine größere Geschwindigkeit als der Pol, auf der Sonnenseite eine kleinere, doch so, daß die Durchschnittsgeschwindigkeit die des Pols ist. Ob er bei Berücksichtigung dieser Tatsache seinen Schluß über die Uhrzeiten aufrecht erhalten hätte, vermag ich nicht zu beurteilen. Aber sein Fehler ist wieder der, v absolut aufgefaßt zu haben, diesmal losgelöst von der Translationsgeschwindigkeit der Erde. Er hat hier wieder als Mathematiker gedacht, der eine errechnete Größe deutet und auf die physikalischen Nebenbedingungen nicht achtet, die jeder wahrhafte Physiker unwillkürlich berücksichtigt.

Nun sind Beobachtungen an Pol- und Äquatoruhr nur Gedankenexperimente; und bei einem wirklich auszuführenden Versuch auf der Erde sind die Zeitdifferenzen so klein, daß sie sich der Beobachtung entziehen: danach scheinen Einsteins Formeln einer experimentellen Prüfung nicht unterworfen werden zu können. Zum Glück haben wir aber eine Himmelsuhr,

die Jupitermonduhr, deren Umlauf auf $42^1/_2$ Stunden festgestellt ist. Konstruieren wir daher auf der Erde eine Uhr, die die gleiche Zeit zum Umlauf gebraucht, stellen sie genau nach der Jupitermonduhr, d. h. den Zeiger auf Null, wenn der Mond im Schatten des Jupiters verschwindet, dann können wir die Uhr auf der Erde als dem festen System mit der Uhr auf dem Jupiter als dem beweglichen System vergleichen. Die X-Achse geht von der Erde nach dem Jupiter; in ihr nähert und entfernt sich Jupiter von der Erde mit wechselnden Geschwindigkeiten. Dann muß nach Einstein die Jupitermonduhr, von der Erde betrachtet, dauernd gegen die $42^1/_2$-Stundenuhr auf der Erde nachgehen. In Wirklichkeit geht sie aber bald bis zu 15 Sekunden nach einem Umlauf *vor*, bald bis zur selben Größe *nach* in regelmäßiger Zu- und Abnahme. Also Einsteins Folgerung aus seiner Lehre steht mit der Beobachtung in *Widerspruch*. Es ist dabei noch ein Glück, daß Einstein nach Olaf Roemer gelebt hat; sonst würde der letztere gar nicht gewagt haben, aus der wechselnden Umlaufszeit des ersten Jupitermonds die Geschwindigkeit des Lichtes zu berechnen.

Bei dieser Sachlage ist zu schließen, daß die Formel nicht *richtig* ist, und es ist zu vermuten, daß sie als solche, auf bestimmte Vorgänge angewendet, zu *widersinnigen Folgerungen* führt. Um dies zu untersuchen, wollen wir annehmen, daß von einem Punkt des Äquators ein Eisenbahnzug mit der Geschwindigkeit v nach Süden fährt. Ferner denken wir uns im Zuge eine horizontal liegende Uhr so aufgestellt, daß der Zeiger nach Osten gerichtet ist, also die Zeigerspitze sich nach Süden in der X-Achse der Einsteinschen Formel bewegt. Ist am Nordpol eine genau gleichgehende Uhr in genau entsprechender Weise aufgestellt und bezeichnet x den Weg der Zeigerspitze in der Zeit t an der Äquator- und der gleichen Poluhr, so ist die Geschwindigkeit der Uhrzeigerspitze auf beiden Uhren $\frac{x}{t}$. Aber diese Geschwindigkeit der Äquatoruhr erscheint am Pol als $\frac{x'}{t'}$. Nun kann zwischen den beiden beobachteten Geschwindigkeiten ein Unterschied bestehen; aber dieser muß verschwindend klein sein, da diese Geschwindigkeiten den durch sie gemessenen Zeiten proportional sind, die Zeiten aber selbst einen verschwindend kleinen Unterschied nach Einstein zeigen sollen. Man darf daher schreiben: $\frac{x}{t} \approx \frac{x'}{t'}$. Setzt man nun für x' und t' die Einsteinschen Werte ein, so ergibt sich: $\frac{x}{t} \approx \frac{x - vt}{t - \frac{vx}{c^2}}$ und, wenn man die Nenner beseitigt: $xt - \frac{vx^2}{c^2} = xt - vt^2$. Unter Wegfall von xt auf beiden Seiten erhält man: $\frac{vx^2}{c^2} = vt^2$. Unter Beseitigung des Faktors v ergibt sich $\frac{x}{t} = c$. Demnach muß die Geschwindigkeit der Zeigerspitze der Äquator- wie der Poluhr die Lichtgeschwindigkeit besitzen, was selbstverständlich ungereimt ist; und da das Ergebnis von der Geschwindigkeit v unabhängig ist, darf man schließen, daß auf Grund der Einsteinschen Formeln jede nur mögliche Geschwindigkeit annähernd 300 000 km betragen muß. Dies ist natürlich völlig unsinnig.

131 Nachdem so Einsteins Formeln das Verständnis seiner Lehre nicht haben eröffnen können, so kann man versuchen, ihr begrifflich näher zu kommen, indem man die in den Formeln auftretenden Größen Weg, Zeit, Geschwindigkeit näher prüft. Zeit und Raum sind einfache Vorstellungen, während die Geschwindigkeit eine abgeleitete ist; denn sie ist das Verhältnis von Weg und Zeit und entweder der Weg in der Zeiteinheit oder die Zeit für die

zurückgelegte Wegeeinheit. Dann ist die Geschwindigkeit von der Zeit abhängig; wenn nun nach Einstein die Zeit wieder von der Geschwindigkeit abhängig sein soll, so kann man kaum anders schließen, als daß die Zeit von der Zeit abhängig ist, ein Schluß, den wohl jeder ablehnen möchte. Ein Mathematiker möchte dann wohl folgern, daß $t = f(t)$ sei. Dürfte er dabei annehmen, daß sich $f(t)$ in eine Reihe entwickeln ließe, so würde er folgern: $t = t$, was vor Einsteins Lehre in der Wissenschaft allgemein gegolten hat. Aber wenn die Zeit eines Ereignisses veränderlich sein soll, wie ist es dann möglich, daß die Geschwindigkeit eines Ereignisses z. B. der Lichtübertragung, konstant sein soll? Müßte die Lichtgeschwindigkeit nicht erst recht veränderlich sein? Jedenfalls darf diese Konstanz nicht a priori als bestehend angenommen werden, sondern muß a posteriori bewiesen werden. Auf diese Frage hat Einstein bisher keine Antwort gegeben! Es ist auch keine zu erwarten, wenn man folgenden Satz liest, der jedes Bedenken gegen seine Lehre von vornherein zurückweisen will. —

Er sagt: „Es spricht a priori nichts dafür, daß zwei in bezug auf K (ein festliegendes Koordinatensystem) gleichzeitige Ereignisse auch in bezug auf K′ (ein mit Translationsgeschwindigkeit versehenes Koordinationssystem) gleichzeitig sein müssen.“ Man kann diesen Satz so auffassen, daß zwei gleichzeitige Ereignisse, deren Orte von einem Punkt in K gleichweit entfernt sind und deren Nachrichten infolge der Lichtgeschwindigkeit demnach gleichzeitig in dem Punkte in K ankommen müssen, nicht notwendig gleichzeitig in diesem Punkte ankommen müssen, wenn er mit K′ fest verbunden ist. Dies ist selbstverständlich, wenn die wirklichen Ereignisse von dem Punkte K′ verschieden weit entfernt sind. Dies soll aber nicht gesagt sein, sondern daß die Zeitdauer eines bestimmten Ereignisses in dem einen Koordinatensystem eine andere sein soll als in dem zweiten. Als verständlich ist diese Meinung nicht zu betrachten. Wenn zwei Ereignisse gleiche Zeitdauer haben, so haben sie diese auch und nichts anderes; und wenn sie zu gleicher Zeit beginnen, müssen sie auch zu gleicher Zeit enden. Wenn ihre Signale an einem dritten Orte nicht gleichzeitig anlangen infolge der verschiedenen Entfernung und der deswegen vom Lichte gebrauchten verschiedenen Zeit, so bleiben sie doch von gleichem Zeitbeginn und gleicher Zeitdauer und werden unter Berücksichtigung der Übermittlungszeit auch als von gleichem Zeitbeginn und gleicher Zeitdauer nachgewiesen werden können. Will man den Einsteinschen Satz auf seine Richtigkeit weiter prüfen, muß man sich erst klar werden, was unter a priori zu verstehen ist.

Kant spricht von einer Erkenntnis a priori, vor aller Erfahrung, und einer solchen a posteriori, auf Grund der Erfahrung. Nun gibt es nach meiner Ansicht für die ganze Menschheit keine Erkenntnis a priori; denn nur aus der Erfahrung konnte die Menschheit und die ihr vorausgegangene Tierwelt Kenntnisse gewinnen und gewinnt auch jetzt noch jeder einzelne seine Kenntnisse. Aber das Werkzeug seines Denkens, das Gehirn, wird nicht von dem einzelnen selbst geschaffen, sondern ihm von seinen Eltern durch Vererbung übermittelt, wie diese es von ihren Vorfahren erhalten haben. Und so werden wir durch dieses Organ, in dem die Verknüpfung der Gehirnzellen miteinander und die leichtere oder schwierigere Verbindung untereinander und die Behaftung dieser Zellen mit gegebenen Vorstellungen das ganze Denken bestimmt, gezwungen, in denselben Bahnen zu denken wie sie. Wir dürfen sogar annehmen, daß die Verknüpfung derselben gleichliegenden Zellen im elterlichen und kindlichen Gehirn untereinander wie auch ihre Verknüpfung mit den Sinneszellen in gleicher Weise vorkommen, so daß in den Nachkommen derselbe Bau des Gehirns auch dieselben Vorstellungen infolge der

gleichen Sinneseindrücke zum Ablauf bringt. Wir haben so unsere Denkorganisation vererbt bekommen und sind dadurch leicht denselben Erkenntnissen wie denselben Irrtümern unserer Vorfahren unterworfen. Aber jede Generation arbeitet infolge der andauernden Denktätigkeit an der Fortbildung des Gehirns und verfeinert so die feinste Maschine ihrer Organisation. Daher wird die spätere Generation bestimmte Gedankenoperationen mit Leichtigkeit abwickeln, die den Vorfahren nur schwierig gelangen. Ihr kommen diese Gedankenoperationen aprioristisch vor, während sie von den Vorfahren a posteriori erzeugt worden sind. Dann ist aber alles, was wir als a priori in uns vorhanden ansehen, uns a posteriori überliefert. Es hat eine lange Zeit gebraucht, um die Konstanz der Summe von Tag und Nacht zu erkennen. Aber sie ist aus der Bewegung der Gestirne, also a posteriori, erworben worden und mit der Konstanz des Sonnentages die Unveränderlichkeit der Zeiteinheit. Aber da wir das a posteriori in den langen Zeiten der Vergangenheit als das a priori der Gegenwart bezeichnen, so ist in dem Sinne, wie Einstein das a priori gebraucht, die Unveränderlichkeit der Zeiteinheit als a priori anzusehen. Daraus folgt, daß der von Einstein angezogene Satz n i c h t als richtig anzusehen ist. Will er daher die Relativität der Zeit zu einer wissenschaftlichen Erkenntnis gestalten, so muß er a posteriori den Nachweis führen, daß unsere bisherige Auffassung von der Unveränderlichkeit der Zeiteinheit falsch ist. Diese Darlegung schiebt ihm also, juristisch gesprochen, die Beweislast zu: sein Satz reicht nicht aus, diese Beweislast von sich abzuwälzen. Und der Nachweis muß sehr sorgfältig, mit zwingenden Gründen, geführt werden, damit die von ihm geforderten Umformungen in unserem Gehirn nicht unnütz und vergeblich gemacht werden.

132 Nun schlägt Einstein einen neuen Weg vor, die Zeit und die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse zu ermitteln. Bisher haben unsere, nach dem mittleren Sonnentage regulierten Uhren vollkommen genügt. Die Abweichungen der von den Uhren an verschiedenen Stellen der Erde angegebenen Zeiten eines bestimmten Ereignisses hängen allein von der geographischen Länge ab. Da aber diese wieder durch den Unterschied der Uhrzeiger zweier nach dem Sonnentage geregelten Uhren gemessen wird, so hängt auch sie von der gleichmäßigen Drehung der Erde um Achse und Sonne ab. Für alle Orte mit mitteleuropäischer Zeit wird die Gleichzeitigkeit der Ereignisse durch die gleiche Zeigerstellung der Uhren angekündigt. Bei den Ländern mit anderer Zeit sind zu den, an einem Orte gemessenen Zeiten noch ganze Stunden hinzuzufügen bzw. hinwegzunehmen, um genau gleiche Zeiten festzustellen. Daher ist eine neue Methode völlig überflüssig. Ob diejenige von Einstein einwandfrei ist, mag nun untersucht werden. Er macht für die Zeitbestimmung folgende Voraussetzungen:

1. Es soll durch irgend welche Mittel dafür gesorgt sein, daß an den beiden Orten gleichgehende Uhren aufgestellt sind;

2. soll durch diese Uhren die Zeit der Absendung des Signals von A nach B in A nach der A-Uhr und die Zeit der Ankunft in B nach der B-Uhr aufgezeichnet werden, ferner bei der Absendung des Signals von B nach A die Zeit des Abganges in B nach der B-Uhr und die Zeit der Ankunft in A nach der A-Uhr;

3. wird angenommen, daß der Zeitunterschied der Uhren in A und B für das erste Signal genau so groß sei wie für das zweite;

4. wird behauptet, daß mit der letzteren Gleichheit die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse genau festgestellt werden könne.

Zu 1. ist zu bemerken, daß es bisher keinen anderen Weg gibt, als Uhren, die nach dem mittleren Sonnentage reguliert werden, in A und B aufzustellen,

daß diese aber ausreichen, um die wahre Gleichzeitigkeit zu ermitteln. Dann ist das Austauschen von Signalen völlig überflüssig. Der Vorschlag schmeckt stark nach dem Rezept, wie Kinder Sperlinge fangen können. Man streut ihnen Salz auf den Schwanz und fängt sie dabei! Wer in die Lage kommt, dem Vogel Salz auf den Schwanz zu streuen, hat ihn schon gefangen: und das Salz ist überflüssig: und wenn man die Uhren nach dem Sonnentage reguliert hat, kennt man die geographische Länge beider Orte, den Zeitunterschied der aufgestellten Uhren nach wahrer Zeit und hat die Signale nicht nötig, um darauf den gleichen Gang der Uhren zu stützen. Die Ermittlung der Gleichzeitigkeit oder Nichtgleichzeitigkeit zweier Ereignisse in A und B ist schon gewährleistet ohne jeden vorhergehenden Probeversuch.

Die in 3 gemachte Annahme, daß die Zeitunterschiede gleich sein sollen, muß erst bewiesen werden, ehe die darauf gestützte Methode als nur erwägenswert angesehen werden darf. Für naheliegende Punkte könnte man an Lichtsignale denken. Nun habe ich in dem vorhergehenden Abschnitt gezeigt, daß die Kombination der Lichtgeschwindigkeit mit der Erdbahngeschwindigkeit, die für alle Punkte der Erde dieselbe ist, dieselbe Zeit in Anspruch nimmt, um eine gegebene Strecke auf der Erdoberfläche zu durchlaufen, welches auch die Richtung ist, also auch dieselbe Zeit für den Hinweg wie für den Rückweg. Danach scheint die Einsteinsche Annahme der Wirklichkeit zu entsprechen. Aber neben dieser Erdbahngeschwindigkeit hat ein Punkt der Erdoberfläche auch seine Rotationsgeschwindigkeit um die Erdachse, die nur für Punkte desselben Breitengrades konstant, im übrigen verschieden groß ist. Demnach muß auch die Zeit für ein Lichtsignal, das zwischen zwei Punkten auf verschiedenen Breitengraden gewechselt wird, für Hin- und Rückweg verschieden sein. Zwar ist der Unterschied ein sehr geringer, da schon die Geschwindigkeit eines Punktes des Erdäquators um die Erdachse noch nicht den sechzigsten Teil der Erdbahngeschwindigkeit beträgt, der Unterschied dieser Geschwindigkeiten auf zwei Breitengraden, die nur wenige Bogenminuten voneinander abweichen, äußerst gering und daher der Zeitunterschied zwischen den Signalen auf dem Hin- und Rückwege unmerklich klein sein muß. Aber was in der Praxis bei Beobachtungen vernachlässigt werden kann, darf in der Theorie nicht übersehen werden; daher ist mein Zweifel an der Richtigkeit der Einsteinschen Annahme berechtigt. Zu 4 ist zu bemerken, daß, wenn die Voraussetzung 3 erfüllt werden könnte, wohl der gleiche Gang beider Uhren, d. h. die gleiche Sekundendauer, festzustellen wäre, daß aber beide Uhren doch nicht die Sekunde gleichzeitig beginnen würden; denn sie würden immer um die Zeit der Übermittlung voneinander im Gange abweichen.

Die Darlegung führt zu dem Schlusse, daß die neue Methode, die Zeit und die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse zu bestimmen, einerseits überflüssig ist, weil die ältere Methode völlig ausreicht und viel einfacher ist, und anderseits unzuverlässig ist, da die Voraussetzung 3 nicht als erfüllt nachgewiesen, ja wahrscheinlich unerfüllbar ist. Aber e i n e Wirkung hat der neue Weg ausgeübt, daß nämlich die Bedeutung des mittleren Sonnentages für die Bestimmung der Gleichzeitigkeit beiseite geschoben und infolgedessen dem vorgefaßten Gedanken der Relativität der Zeit der Zutritt ermöglicht bzw. die Zurückweisung verhindert wurde. Der neue Weg erscheint auf den ersten Eindruck als der Ausfluß höchsten wissenschaftlichen Denkens und erweist sich bei näherer Betrachtung als ein dilettantenhafter Versuch mit untauglichen Mitteln.

133 Neben der Relativität der Zeit, d. h. daß die Zeit eines Ereignisses abhängig sei von Geschwindigkeiten, die mit dem Ereignisse an sich nichts zu

tun haben, hat Einstein auch eine Relativität des Raumes oder Volumens aufgestellt. Sie folgt aus der ersten Einsteinschen Formel: $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Denn diese Formel ergibt für zwei Punkte der x-Achse x_1 und x_2 $x'_1 = \frac{x'_1 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, $x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Durch Subtraktion erhält man $x'_1 - x'_2 = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, d. h. die Länge $x'_1 - x'_2$ im bewegten System muß mit $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ multipliziert werden, um die entsprechende Länge im ruhenden System zu ergeben. Da $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ ist, muß $x'_1 - x'_2 > x_1 - x_2$ sein, also ist die Länge einer Strecke im bewegten System in der Richtung der Bewegung größer als im ruhenden System. Eine weitere Begründung als die Ableitung der Formel aus seiner Gleichung hat Einstein nicht angegeben; nur hat er sie mundgerecht zu machen gesucht durch die Behauptung, daß die Messung der Länge eines sich bewegenden Eisenbahnzuges prinzipiell verschieden sei von der eines ruhenden. Die Länge des letzteren wird durch direkte Abmessung ermittelt, die des ersten durch Bestimmung des Anfangs- und Endpunktes in einem gegebenen Augenblicke und durch direkte Ausmessung dieses Abstandes. Worin der prinzipielle Unterschied dieser Messungen bestehen soll, ist mir unverständlich, ebenso warum die Länge des Zuges von der Geschwindigkeit v abhängig sein soll. Einen irgendwie klaren Zusammenhang zwischen dieser Länge und Geschwindigkeit hat Einstein nicht angegeben. Auch darf man vermuten, daß er dazu nicht imstande ist, sonst würde er nicht verfehlt haben, ihn seiner Rechnungsinterpretation hinzuzufügen.

Aber gegen diese Relativität des Raumes erhebt sich noch ein anderes wichtiges Bedenken. Denn sie fordert eine physikalische Änderung des Zustandes des im Raum befindlichen Körpers: und die Änderung dieses Zustandes ist immer mit einer Verlagerung von Energie verknüpft; verlagert kann aber nur freie Energie werden: wo ist nun die freie Energie, die das Volumen ändert? Eine physikalische Erscheinung ist erst dann vollkommen erklärt, wenn die freie Energie nachgewiesen ist, deren Verlagerung die Erscheinung bewirkt. Bei Einstein finden wir diesen Punkt nicht berührt; und es scheint, daß er glaubt, auf diese Erörterung Verzicht leisten zu dürfen. Vielleicht ist er sich auch gar nicht bewußt, daß er mit seiner Relativitätstheorie auch dieses Fundament unserer Erkenntnismöglichkeit in Frage stellt.

134 Hier möchte ich noch auf die besondere Tatsache hinweisen, daß Einsteins Gedankenentwicklung in einer Richtung verläuft, die derjenigen gerade entgegengesetzt ist, die die Naturwissenschaft beherrscht und sie zur jetzigen Höhe hinaufgeführt hat. Die Relativität als die Möglichkeit, eine Erscheinung in verschiedener Weise zu erklären, ist bei allen Kulturvölkern im Laufe ihrer Entwicklung zutage getreten. Aber die Tendenz ging immer dahin, von den verschiedenen Möglichkeiten eine als die richtige Erklärung festzulegen und die anderen als falsch nachzuweisen, d. h. das Ungewisse oder Relative zu beseitigen. Schon einzelne griechische Gelehrte haben die später als kopernikanisch bezeichnete Weltanschauung ausgesprochen und vorgetragen; diese Lehre ist beim Verfall der antiken Kultur verlorengegangen, besonders weil damals sichtbare Beweise für sie nicht aufgefunden wurden. Jetzt, nachdem eine ganze Reihe von Beobachtungen und Versuchen sie als richtig bewiesen haben, ist von den beiden Möglichkeiten der Erklärung die Kopernikanische als die wahre erklärt. Selbst Einstein wird in diesem Falle keine

Relativität mehr behaupten. Zur Messung der Temperatur hat man anfangs einen willkürlichen Nullpunkt gewählt, 32° Fahrenheit unter dem Gefrierpunkt des Wassers; jetzt hat die Wissenschaft mit — 273° C einen absoluten Nullpunkt festgelegt. Das ganze Ziel der Wissenschaft geht dahin, die willkürlichen Annahmen auszumerzen und eindeutige Erklärungen der Erscheinungen zu finden, also das Relative zu beseitigen. Wenn die Wissenschaft glaubt, für eine Erscheinung mehrere Erklärungen nebeneinander zu haben wie beim Lichte in der Emanations- und Undulationstheorie, so sucht sie solange nach Beweisen, bis die eine Theorie als falsch und die andere als richtig festgelegt ist. Sieht man diese Entwicklung als Fortschritt an, so ist Einstein als Rückschrittler anzusprechen. Er glaubt, zwei Erklärungen für denselben Vorgang nebeneinander als gleichberechtigt anerkennen zu dürfen und verzichtet damit auf die Forderung einer eindeutigen Erklärung.

135 Im vorhergehenden Abschnitt habe ich eine einfache Erklärung der Gravitation gegeben; zum Vergleich mag die Einsteinsche kurz skizziert werden. Er betrachtet ein Koordinatensystem, das sich mit gleichförmiger Beschleunigung bewegt, z. B. einen fallenden Apfel, in einem festen Koordinatensystem, der Erde. Er bemerkt, daß die gleiche Erscheinung beobachtet wird, wenn der Apfel still steht und die Erde in entgegegesetzter Richtung mit derselben Größe beschleunigt wird. Dies ist richtig für einen Apfel A an seiner Stelle. Aber wenn wir diese besondere Beschleunigung der Erde, die den Fall des einen Apfels A erklären soll, auch für den Fall aller Äpfel auf der Erdoberfläche zugrunde legen wollten, müßten sich alle in der Richtung des Apfels A bewegen. Auf der gerade entgegengesetzten Stelle der Erdoberfläche müßte der Apfel in die Luft steigen, und außer an der Stelle des Apfels A dürfte kein Apfel — scheinbar — nach dem Schwerpunkte der Erde sich bewegen. Daher ist dieser Weg der Erklärung völlig ungangbar; aber sein Versuch dient als gutes Beispiel für die Erkenntnis, daß die Relativität der Bewegungen eine sehr beschränkte ist und daß die Annahme, die Erde bewege sich in gleichförmig beschleunigter Weise zu dem Apfel hin, durch die tatsächliche Erfahrung ausgeschlossen wird. Da alle Äpfel nach dem Schwerpunkte der Erde fallen, so müßte nach Einsteins Vorstellung die Erde nach allen Richtungen gleichförmig beschleunigend bewegt werden, also nach keiner. Daher kann die Ursache des freien Falls nicht in einer Bewegung der Erde gefunden werden, sondern in der Anhäufung von freier Energie an allen Punkten oberhalb der Erde, welche durch Übergang auf den Apfel diesen zur Erde treibt, was ja bei meiner Vorstellung der Fall ist. Bei Einstein fehlt auch der Nachweis der freien Energie, die die Erde gegen den Apfel treiben soll, welcher Nachweis für die wissenschaftliche Erklärung jetzt unerläßlich ist.

Einstein bildet dann die Vorstellung eines Gravitationsfeldes, das den Körper zwingt, eine vorgeschriebene Bahn zu beschreiben, ohne anzugeben, welches der letzte mechanische Grund ist, der den Körper zu dieser Bahn nötigt. Für mich ist seine Vorstellung eine Verlegenheitsvorstellung, während meine Elektronenvorstellung das, was er Gravitationsfeld nennt, begreiflich macht. Fern von den Weltkörpern bewegen sich die Elektronen im Raume in gleicher Dichtigkeit und gleichmäßig nach allen Richtungen, so daß sie dort im Energiegleichgewicht stehen und auf die Vorgänge im Weltall ohne Einfluß sind. In der Nähe der Weltkörper werden die Elektronen, die nach dem einen Körper hinstreben, durch den anderen abgewehrt, und es wird dadurch eine Störung des Gleichgewichtszustandes hervorgerufen. Massen, die sich in der Nähe der Sonnen befinden, nehmen einen Teil der Sonnenenergie auf und geben sie an die auf sie stoßenden Elektronen ab, ein Vorgang, den wir

Strahlung nennen, und der gleichfalls in etwas den Gleichgewichtszustand ändert. Diese ungleiche Verteilung der Elektronenenergie wird infolge der großen Beweglichkeit der Elektronen an den Stellen, wo sie hervorgerufen wurde, schnell wieder ausgeglichen, z. B. bei der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne. Wo die Erde hinkommt, da wird das Energiegleichgewicht im Elektronenmeere gestört, um nach ihrer Fortbewegung von dieser Stelle schnell wieder hergestellt zu werden. So führen die Massen im Weltenraume, z. B. das Sonnensystem, eine Gleichgewichtsstörung der Energieverteilung der Elektronen mit sich, so daß es dauernd von diesem Störungsgebiet umgeben ist. Aber dies Gebiet ist nicht unmittelbar mit dem Sonnensystem verknüpft, so daß dieselben Elektronen es in ihrer gestörten Verteilung begleiten. Sondern die Wirkung zwischen den Elektronen und den Massen des Sonnensystems ruft an der Stelle des Weltenraumes, wo sich das Sonnensystem gerade befindet, in den dort vorhandenen Elektronen diese Störung herbei. Die Richtung der wirkenden Elektronenenergie wird durch die Form der Oberfläche gleicher Energie bestimmt und steht an jedem Punkte dieser Niveaufläche senkrecht zu ihr und erstreckt sich selbstverständlich nach der nächsten Niveaufläche minderer Energie; demnach ist die Richtung der Energieverlagerung nicht von der Größe der verlagerten Energie abhängig, sondern von der Verteilung der Energie der ganzen Umgebung. Dabei ist es nicht notwendig, daß sich im Sonnengebiete nur ein einziges Maximum ausbildet; es ist sehr wohl möglich, daß gleichzeitig mehrere Maxima und Minima auftreten, ähnlich den Maxima und Minima in unserer Atmosphäre.

Eine besondere Störung des Gleichgewichtszustandes der Elektronen wird durch die glühenden Körper, z. B. die Sonne, veranlaßt, da diese die ausgehenden Elektronen an irgendeiner Stelle immer in parallelen Bahnen fortschleudern, während die an derselben Stelle eingehenden von allen Richtungen kommen. Dadurch wird zwar nicht die Elektronendichtigkeit in der Umgebung der Sonnen geändert, aber die Richtung der Energie, so daß die Niveauflächen gleicher Elektronenenergie mit den Sonnen konzentrische Kugelflächen sind. Auf diesen Umstand dürfte sowohl die Ablenkung der Lichtstrahlen, die tangential an der Sonne vorbeigehen, zurückgeführt werden, wie auch die Perihelverschiebung des Merkurs.

Zur Erklärung der ersteren ist zu bemerken, daß die von der Sonne ausgehenden Elektronen alle zur Oberfläche senkrecht stehen und daher an jeder Stelle einander parallel sind. Die nach der Sonne zurückkehrenden Elektronen kommen von allen Seiten und stören diesen Parallelismus, ohne ihn jedoch ganz aufheben zu können. Man darf daher die von der Sonne ausgehenden Elektronen auf einem längeren Wege als annähernd parallel ansehen. Diese stoßen mit den Bündeln Sternenlichtes, das in einer Tangentialebene der Sonne an ihr vorübergeht, unter fast rechten Winkeln zusammen, so daß sie, soweit sie von den Sonnenstrahlen getroffen werden, etwas von der Sonne weg abgelenkt werden. Die Ablenkung kann nur sehr klein sein, da der Zusammenstoß nur eine verschwindend kleine Zeit dauert. Aber der Lichtstrahl, der das Auge trifft, scheint von einem, der Sonne näheren Stelle zu kommen. Die vom Stern kommenden Elektronen werden nur zu einem kleinen Teil einen Kernstoß durch die Sonnenelektronen erhalten; daher wird die Ablenkung in der Weise erfolgen, daß das Bündel parallel laufender Sternelektronen in ein mehr oder minder divergierendes Bündel umgewandelt wird; demnach muß das Bild des Sterns etwas größer, aber auch etwas schwächer erscheinen. Nach Einsteins Vorstellung muß der Lichtstrahl des Sternes nach der Sonne zu gebogen werden, da sein Gravitationsfeld der Sonne zugerichtet ist, also auch die Lichtstrahlen der Sonne zudrängt. Dann

muß der Stern als von der Sonne weiter abstehend erscheinen, als er gesehen wird, wenn er nicht nahe an der Sonne steht. Vielleicht kann schon das Ergebnis der letzten Sonnenfinsternis über diesen Punkt eine Aufklärung bringen.

Einstein hält auch Schwerkraft und Trägheit für gleichbedeutend, während sie ganz verschieden sind. Die Schwerkraft eines Körpers an einer gegebenen Stelle der Erdoberfläche ist dauernd dieselbe; die Trägheit kann sich ändern. Der Begriff der Trägheit ist bisher unklar geblieben; es ist der Widerstand eines Körpers gegen einen anderen, mit dem er zusammenstößt. Dieser Widerstand hängt von dem Unterschied der Geschwindigkeiten und der Massen beider Körper ab. Daher muß der Begriff aus diesen Unterschieden entwickelt werden. Für mich ist die Trägheit eines Körpers die Energiemenge, die er aufnehmen muß, um mit dem zweiten Körper zum Energiegleichgewicht zu kommen. Daher ist die Trägheit eines Körpers abhängig von den Zuständen beider Körper und demnach eine veränderliche Größe.

136 Einsteins neue Anschauungen liegen auf dem Grenzgebiete der Physik und Metaphysik. Da darf man erwarten, daß sich die Philosophen mit seiner Lehre beschäftigt haben, da nach Herbart die Aufgabe der Philosophie die Kritik der Begriffe ist. Sie haben sich der Lehre auch recht liebevoll angenommen, aber sich im wesentlichen damit beschäftigt, wie sie ihre Lehren einzurichten hätten, wenn Einsteins Theorie richtig sein sollte. Aber sie haben darin enttäuscht, daß sie das Problem nicht bei den Hörnern angepackt haben, ob sie richtig ist, ob sie richtig sein kann, ob t und t′ voneinander wirklich verschiedene Größen oder nur scheinbar verschiedene Größen derselben unwandelbaren Zeit sind, ob die Zeit eines Ereignisses von der Geschwindigkeit des Körpers, auf dem es sich abspielt, abhängig ist, abhängig sein kann, ob Einstein stillschweigend allgemeine Naturgesetze einschränkt, um seine Lehre zu ermöglichen, ob die Art, wie er das a priori behandelt, vom philosophischen Standpunkte geduldet werden kann usw. Ich habe nicht einmal gefunden, daß sie die Unklarheit hervorgehoben haben, die in seiner Vorstellung der Gleichzeitigkeit steckt. Sie kann einmal den gleichen Zeitbeginn und einmal die gleiche Zeitdauer bedeuten. Daher ist bei der Nachprüfung von Einsteins Darlegungen darauf zu achten, ob er diese beiden Aussagen, die in der Gleichzeitigkeit stecken, immer voneinander getrennt gehalten und nicht etwa durch deren Vermengung unsichere Schlüsse gezogen hat.

Vor allem aber ist den Philosophen das Folgende vorzuhalten: Nach ihren Lehren ist die Anschauung der Ursprung jeder Erkenntnis. Auf Grund einer Menge von Anschauungen gleicher Art wird die Vorstellung gebildet und aus einer Menge gleichartiger Vorstellungen der Begriff gewonnen. Einstein verfährt anders. Seine Relativitätstheorie leitet er aus einer Rechnung ab, also aus einer Tätigkeit, die von jeder Art Anschauung absieht und nur mit dem Abstraktesten, was wir kennen, mit Zahlen operiert. Das Ergebnis dieser Rechnungen sind Gleichungen, deren Ausdeutung zu einem Satze führt, aus dem ein neuer Begriff abgeleitet wird, für den nachher eine ausreichende Vorstellung gesucht wird. Weil die Gleichung, zu welcher seine Rechnung führt, aussagt, daß die Zeitdauer desselben Ereignisses, in einem ruhenden und einem bewegten Koordinatensystem gemessen, verschieden groß ist, wird eine Vorstellung gesucht, die diese Verschiedenheit verständlich machen soll. Statt daß aus Anschauung und Vorstellung der Begriff erfolgt, soll aus einem aus der Rechnung abgeleiteten Begriff Vorstellung und Anschauung folgen. Dies ist die gerade Umkehrung des wissenschaftlichen Denkens, also

ein Zerrbild desselben. Daß die Philosophie gegen dieses Verfahren Einsteins nicht Einspruch erhoben hat, ist ihr zum Vorwurf zu machen.

137 Die Einsteinsche Lehre ist innerhalb der letzten sechzig Jahre nicht die einzige auf dem Grenzgebiet der Naturwissenschaft und Philosophie gewesen, die die Geister beschäftigt hat. Zunächst kam der große englische Gelehrte Thomson zu der eigentümlichen Annahme, die Materie nicht als etwas an sich Seiendes aufzufassen, sondern sie auf eine Bewegung zurückzuführen, also als etwas durch die Bewegung Seiendes. Die Energie war als abhängig von Masse und Geschwindigkeit erkannt. Ließ sich nun die Masse selbst auch als Bewegung auffassen, so war die Bewegung das einzig Seiende, und der Dualismus in der Natur beseitigt. Auf eine Abhandlung von Helmholtz sich stützend, nach welcher Wirbelbewegungen in einem unendlichen Fluidum erhalten bleiben, nahm er solche Bewegungen im Weltenraum als Grundlage alles Seienden an und faßte die Materie als Knotenpunkte solcher Wirbelbewegungen auf. Es ist mir nicht bekannt, daß diese Auffassung zu irgendeiner klaren Vorstellung geführt hat. Das Fehlen einer solchen mag der eine Grund sein, weshalb der Gedanke nicht weiter verfolgt wurde, während der andere darin liegt, daß die Wirbelbewegungen diskrete, gegeneinander verschiebbare Teilchen, also Massen voraussetzen, die gerade durch diese Bewegungen verständlich gemacht werden sollten.

Vor vierzig Jahren wurde ein anderer Gedanke in ähnlicher Weise in die Wissenschaft geworfen, die Frage, ob unser Raum drei oder vier Dimensionen habe; und der recht bedeutende Gelehrte Zöllner hat die Vierdimensionalität des Raumes mit Eifer behauptet und sich infolgedessen in das Lager der Spiritisten begeben. Der Ausgangspunkt war eine mathematische Überlegung. Es gibt in einer Ebene kongruente und nur symmetrische Dreiecke, die in allen Seiten bzw. Winkeln übereinstimmen, von denen aber die letzteren durch Verschiebung in der Ebene nicht zur Deckung gebracht werden können. Um sie zur Deckung zu bringen, muß man das eine Dreieck um eine Seite um 180° drehen, also die dritte Dimension des Raumes zu Hilfe nehmen. Nun sind rechte und linke Hand nicht konguent, sondern nur symmetrisch. Wenn nun der Raum vier Dimensionen hätte, so wäre es denkbar, aber durchaus nicht notwendig, daß man beide gleichfalls zur Deckung bringen könnte. Zöllner und seine Anhänger nahmen an, daß dies möglich wäre und behaupteten, daß der Raum vier Dimensionen hätte. Wie Einstein, konnte auch Zöllner sagen: a priori spricht nichts gegen die Vierdimensionalität des Raumes. Nach meiner Auffassung des a priori spricht alles dagegen; denn noch nie ist ein Fall festgestellt, in dem der Raum sich als mit mehr als drei Dimensionen behaftet erwiesen hätte, so daß das aus dem a posteriori durch Vererbung hervorgehende a priori nur drei Dimensionen annehmen kann. Und ebenso hat Einstein nicht bewiesen, sondern nur, auf eine Rechnung sich stützend, behauptet, daß die Zeit eines Ereignisses eine verschiedene Größe hat, je nachdem es sich auf einem ruhenden oder einem bewegten Körper abspielt.

Hier drängt sich die Frage auf, ob Einstein dasselbe Schicksal teilen wird, das Thomsons und Zöllners Lehre ereilt hat. Nach meiner festen Überzeugung muß sie es; denn bis jetzt fehlt jede auf die Anschauung und Erfahrung gestützte Begründung. Jedenfalls müßte er ganz andere Mittel und Wege einschlagen, um sein Ziel zu erreichen. Was ihn zu seiner Aufstellung veranlaßt hat, ist der unbefriedigende Zustand unserer Lehre vom Lichte. Während vor vierzig Jahren der erwähnte englische Gelehrte Thomson sagen konnte, daß das Einzigfeststehende in der Optik die Existenz des Äthers sei, während alles übrige fraglich bliebe, ist es jetzt so, daß gerade der Äther

als das Fragliche angesehen werden muß. Einstein ist sich der Mangelhaftigkeit unserer Vorstellungen vom Lichte bewußt: denn er sagt (Seite 708), „daß der Äther nur nutzloses Beiwerk der Theorie war, seitdem man auf eine mechanische Deutung des Lichtes verzichtet hatte". Das heißt doch, daß eine mechanische Deutung der Lichtenergie, wie ich sie gegeben habe, vorzuziehen gewesen wäre und daß man nur aus Ermangelung eines Besseren zur elektromagnetischen Lichttheorie gegriffen hätte. Wer sich aber in seinem Innern dieses Mangels der jetzigen Lichttheorie bewußt ist, hätte die Grundlagen derselben sorgfältig prüfen müssen, ehe er wagte, der Zeitvorstellung den Zustand des Absoluten abzusprechen. Hätte er nicht eine errechnete Gleichung ausdeuten wollen, sondern die Huyghensschen Grundvorstellungen, auf denen die heutige Optik noch beruht, einer Kritik unterworfen und hätte er die Erkenntnis überall verwertet, daß jede Zustandsänderung in der Natur die Folge einer Energieverlagerung ist, so würde er für die Wissenschaft wohl etwas dauernd Brauchbares geleistet haben.

Zum Schluß soll hier nun eine Kritik der Huyghensschen Vorstellungen folgen, die, wenn sie treffend ist, auch positiven Fortschritt bedeutet.

138 Nach Huyghens ist der Berechnungsexponent n das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in zwei Medien, z. B. bei Luft und Wasser, wenn also das Licht aus Luft in Wasser übertritt, gleich $\frac{4}{3}$, d. h. die Geschwindigkeit des Lichts in Luft verhält sich zu der in Wasser wie 4 : 3. Nun beträgt die Geschwindigkeit des Lichtes in Luft 300 000 km; demnach muß sie in Wasser 225 000 km sein. Geht nun der Lichtstrahl aus dem Wasser von neuem in Luft, so gewinnt er sofort die 300 000 km wieder. Wie soll dies verstanden werden? Meines Erachtens ist diese Annahme unhaltbar; denn sie würde zulassen, daß eine Geschwindigkeit aus nichts entstände: und wenn diese Geschwindigkeit auch nur an den masselosen Äther geknüpft wäre, so würde sie doch, auf die Materie übertragen, dort Energie, also aus nichts, erzeugen.

Sieht man von der falschen Vorstellung Newtons ab, daß die Masse des widerstehenden Mediums die Lichtpartikeln anzieht, und ersetzt sie durch die natürliche, daß das Durchdringen der Elektronen durch ein Medium deren Geschwindigkeit vermindert, und zwar im dichteren Medium stärker als im dünneren während gleicher Zeiten, so kommt man zu folgender Vorstellung. Sinkt beim Durchdringen durch einen Meter des Mediums die Geschwindigkeit im ersteren (Luft) von v auf v_l, im letzteren (Wasser) von v auf v_w, wo $v_l > v_w$ ist, so sind die Reibungsarbeiten für die Längeneinheit $\frac{1}{2}$ m $(v^2 - v_l^2)$, bzw. $\frac{1}{2}$ m $(v^2 - v_w^2)$; diese verhalten sich wie $(v - v_l)$ zu $(v - v_w)$, da das Verhältnis $\frac{v + v_l}{v + v_w} \sim 1$ ist, also die Reibungsarbeiten verhalten sich wie Geschwindigkeitsabnahmen. Je größer die Widerstandsarbeit für die Längeneinheit ist, desto kleiner ist der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg. Also sind die Widerstandsarbeiten und die in der Zeiteinheit zurückgelegten Wege umgekehrt proportional. Folglich stehen auch die in der Zeiteinheit zurückgelegten Wege im umgekehrten Verhältnis zu den Geschwindigkeitsabnahmen. Das Verhältnis dieser in der Zeiteinheit zurückgelegten Wege stellt aber den Berechnungsexponenten dar. Demnach ist der Berechnungsexponent zweier Medien das umgekehrte Verhältnis der Geschwindigkeitsabnahmen in ihnen für die Längeneinheit, d. h. $(v - v_l) : (v - v_w) = 3 : 4$, wobei v, v_l, v_w von 300 000 km nur wenig abweichen. Es muß sich dann die Energie eines Elektrons in dem dichteren Medium schneller erschöpfen als in dem dünneren. Von einer vollen oder auch nur erheblicheren Erschöpfung kann aber gar keine Rede sein, da die Energie der Elektronen durch die

Medien Wasser und Glas auch auf längere Strecken nur wenig geschwächt werden und anderseits ihre Energie durch den Zusammenstoß mit anderen Elektronen wieder aufgefüllt wird. Das Erlöschen der Lichtwirkung für unser Auge beruht darauf, daß die Elektronen durch den Zusammenstoß mit der Materie aus ihrer Bewegung in parallelen Bahnen abgelenkt werden und dadurch ihre Einwirkung auf unsere Netzhaut mehr und mehr verringert wird.

139 Huyghens stützt die Ableitung des Brechungsgesetzes auf seine Elementarkugelwellen. Er nimmt an, daß durch die Lichtenergie in jedem Punkte, wo eine Richtungsänderung der transversalen Schwingungen stattfindet, also nicht nur an der brechenden Fläche Ekw erzeugt werden, die sich durch den ganzen Raum ausbreiten. Dann müssen diese Wellen diese Lichtenergie sehr schnell nach allen Seiten zerstreuen; und jedes scharfe Bild muß unmöglich sein. Man muß bedenken, daß ein Lichtstrahl in jeder Sekunde mehr als 400 Billionen Schwingungen macht und daß er bei jeder Richtungsänderung der Schwingungen eine Ekw erzeugt, also mehr als 800 Billionen.

Nun kommt ein Weiteres hinzu. Die auf den Äther übertragene Lichtenergie bewegt sich im Weltenraume oder in einem Medium gradlinig fort, ändert aber beim Eintritt in ein anderes Medium die Richtung, um in diesem wieder gradlinig fortzuschreiten. Um dies zu erklären, konstruiert Huyghens die Ekw solcher Schwingungen, die in gleichem Schwingungszustande sind, die aber die brechende Fläche nicht gleichzeitig, sondern nacheinander treffen, und legt an die Kugeln dieser Wellen, deren Radien der im neuen Medium durchlaufenen Zeit proportional sind, eine gemeinsame Tangentialebene und behauptet, daß die Normale zu dieser Tangentialebene die neue Richtung des Lichtstrahls ergeben müsse. Dies ist zwar geistreich gedacht, aber erklärt nichts. Es ist nur eine geometrische Konstruktion, während im Lichtstrahl Energien fortbewegt werden. Die Zeichnung als solche kann doch nie die Richtungsänderung der Lichtenergie erklären. Es wiederholen sich nun in einer Sekunde die Schwingungen an einer gegebenen Stelle mehr als 400 Billionen mal. Der Abstand zweier aufeinander folgender Schwingungen beträgt noch nicht $^1/_{1000}$ mm. In diesem kleinen Zwischenraume spielen sich die verschiedenen Schwingungszustände der Lichtwelle ab. Sollte es da nicht eher zu erwarten sein, daß die in der ursprünglichen Richtung orientierten Schwingungen, nachdem sie durch die Brechung nicht mit ihren Bewegungen in derselben, senkrecht zur Richtung stehenden Ebene gehalten werden konnten, in diese durch minimale Verschiebungen wieder zurückgebracht werden und so die alte Richtung beibehalten? Solange die Vorstellung herrscht, daß die Lichtenergie dem hypothetischen Äther überantwortet wird, der jedem feinsten Druck nachgeben soll, bleibt es unverständlich, daß sie ihrem eigenen Drucke nicht folgt, sondern nach der Brechung eine andere Richtung einschlägt.

Ferner wird die durchaus nicht unmittelbar einleuchtende Annahme gemacht, daß alle von einer Lichtquelle ausgehenden Lichtstrahlen in derselben Schwingungsphase sind, d. h. alle diejenigen, die gleichzeitig durch eine zur Lichtrichtung normale Ebene gehen. Nur diese Voraussetzung erklärt das Fehlen von Interferenzerscheinungen bei bestimmten Versuchen. Nun wird man einwenden, daß die Gleichheit der Schwingungsphase für alle parallellaufenden Strahlen vorausgesetzt werden muß auf Grund des Ausbleibens der Interferenzerscheinungen. Das ist richtig, aber mit der Notwendigkeit der gleichen Schwingungsphase ist der Grund dafür noch nicht aufgefunden. Huyghens geht, soviel ich weiß, über eine Erklärung hinweg. Es muß doch eine, dem Verständnis zugängige Annahme gemacht werden, weshalb alle

Molekeln oder Atome des glühenden Körpers nur Schwingungen gleicher Phase auf den Äther übertragen, oder, wenn das nicht der Fall ist, weshalb der Äther sie alle zu Schwingungen gleicher Phase ordnet. In dem einen Falle müßte man eine Hypothese über den Zustand des glühenden Körpers machen, in dem anderen über die Einwirkungen der Schwingungen aufeinander. Aber da sie auf einen masselosen Äther übertragen werden, ist nicht recht einzusehen, wie diese Einwirkung möglich ist. Jedenfalls ist hier eine erhebliche Lücke in unserer bisherigen Erkenntnis auszufüllen.

Dann kommt weiter die Frage hinzu: wie ist neben der Richtungsänderung der Schwingungen in dem neuen Medium auch die Geschwindigkeitsänderung derselben zu erklären. Denn die Schwingungen des Äthers setzen sich im Äther fort, der sich zwischen der Materie befindet. Die tatsächlich bestehende Verminderung ist aus der Äthervorstellung heraus bisher nicht erklärt und kann meines Erachtens auch nicht erklärt werden, so lange man an die Fortpflanzung der Energie durch einen masselosen Äther glaubt. Diese Bedenken gegen die Huyghenssche Auffassung der Lichtvorgänge sind so erheblich, daß sie ohne weiteres nicht mehr aufrecht erhalten werden kann, und daß sie ebenso zweifelhaft erscheint, wie die Newtonsche Auffassung seit bald einem Jahrhundert als falsch nachgewiesen angesehen wird.

140 Die genannten Schwierigkeiten können aber beseitigt werden, wenn die Elektronen als die Träger der Lichtenergie angesehen werden. Die gleiche Phase, in der die Strahlen eines Lichtbündels sich befinden, kann auf den Zustand, in dem ein glühender Körper sein muß, und auf die damit in Zusammenhang stehende Elektronenabsonderung zurückgeführt werden. Wird ein fester Körper allein durch Wärmezufuhr in den flüssigen übergeführt, so sind bei den hohen Temperaturen die Molekeln bzw. Atome in ihrer Bewegung nicht mehr ganz frei, sobald die Wärmeschwingungen so groß werden, daß der enge Abstand der kleinsten Teile voneinander nicht mehr ausreicht. Um sich als Gasmolekeln von der erwärmten Masse abzusondern, fehlt ihnen die erforderliche Energie. Dann müssen aber auf Grund des Wärmezustandes die Schwingungen in so gleichmäßig geordneter Weise vor sich gehen, wie wir sie sonst nur bei gut ausgebildeten Kristallen voraussetzen. Während es aber dort die durch die Kristallbildung veranlaßte gleichmäßige Lagerung ist, die die Regelmäßigkeit der Schwingungen bedingt, ist es hier der zu knappe Raum, der die gleichmäßigen Schwingungen der Atome fordert, da nur dadurch die vorhandene Energie beharren kann. Dann werden alle Atome gleichzeitig nach vorn und gleichzeitig nach hinten in parallelen Ebenen schwingen. Nur beim Vorschwingen können sich die Elektronen von den Atomen in dem Augenblicke loslösen, in dem die Umkehr der Schwingungsbewegung einsetzt. Dann ist ohne weiteres einzusehen, daß sie die Atome in gleicher Phase verlassen. Dazu kommt noch ein zweiter Punkt. Wenn ein Elektron seine Bahn in einer Schraubenlinie zurücklegt, sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden: entweder ist der Zylinderraum, der die ganze Bahn einhüllt, so eng, daß er nicht in den Zylinderraum des benachbarten Elektrons eingreift, oder er ist nicht so eng. Im letzteren Falle müssen die Elektronen, die nebeneinander herfliegen, sich auf ihrer Bahn gegenseitig stoßen, wenn sie nicht von gleicher Phase sind. Nun ist es aber im allgemeinen nicht als wahrscheinlich anzusehen, daß das Elektron sich in einer Bahn bewegt, deren Durchmesser gleich oder kleiner ist als der Durchmesser des Atoms, aus dem es sich abgesondert hat. Vielmehr wird man eine spiralig verlaufende Bahn um die translatorische Achse anzunehmen haben wie bei den Geschossen aus einer Flinte oder Kanone. Wenn aber die Zylinderräume zweier Elektronenbahnen sich überdecken, kann nur die gleiche

Phase der Schwingungen die Zusammenstöße mit ihrer Begleiterscheinung des Aufstauens der Bewegungen vermeiden. Sie ist also die Bedingung, unter der allein ein glatter Verlauf der Lichtstrahlenbündel möglich ist. Und die Quelle dieser Ordnung ist die kolossale Energie, die in jedem einzelnen Elektron steckt und die die Hemmung seiner Bewegung aus dem Wege schaffen muß und auch schafft, ebenso wie ein zum Sturmangriff jagendes Reiterregiment jedes Pferd auch wider seinen Willen mit sich fortreißt und zwingt, in dieser Bewegung zu bleiben.

Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, daß man die Vorgänge noch etwas anders auffassen kann, daß nämlich die Elektronen zunächst in ganz verschiedener Phase aus den Atomen hinausgesandt werden, daß sie aber beim Durchgang durch die Materie eine Verbreiterung des Zylinderraumes ihrer Bewegung erleiden, und daß sie erst hierdurch gezwungen werden, sich gleichphasig einzustellen, da ihre Energie sonst nicht gleichmäßig abfließen könnte. Aber jedenfalls würde auch in diesem Falle das Streben, die kinetische Energie in ihrem Flusse zu erhalten, der Grund für die gleiche Einstellung der Bewegungen sein.

141 Nun gehe ich dazu über, die verfehlte Newtonsche Erklärung der Lichtbrechung unter Aufrechterhaltung der Emissionstheorie durch eine neue zu ersetzen. Wenn die Lichtteilchen mit 300 000 km Geschwindigkeit diese beim Durchdringen von ruhenden Körpern ändern, kann sie nicht vermehrt, sondern nur vermindert werden; denn dieser Zusammenstoß bringt eine Übertragung von Energie auf den materiellen Körper mit sich, da letzterer nicht vollkommen elastisch ist. Die übertragene Energie kann nicht groß sein, da zur Übertragung Zeit gehört und diese bei der ungeheuren Geschwindigkeit nur gering ist. Die Energieabgabe ist bei den Atomen der verschiedenen Elemente verschieden groß, daher auch der Geschwindigkeitsverlust in den verschiedenen Medien. Tritt nun ein Bündel von Elektronen in gleicher Schwingungsphase senkrecht auf die Grenzfläche zweier Medien, so kommen alle Schwingungen dort in gleicher Phase an und bewegen sich im neuen Medium, wenn auch plötzlich mit veränderter Geschwindigkeitsabnahme, in gleicher Phase weiter, und zwar in derselben Richtung, da kein Grund vorliegt, diese zu ändern. Fährt dagegen dieses Bündel schräg gegen die Grenzfläche des neuen Mediums, so kommen die Elektronen gleicher Phase erst nacheinander in der kurzen Zeitstrecke τ an der Grenzfläche an, während die gleichzeitig die Grenzfläche passierenden Elektronen in verschiedener Phase sind. Das zuerst ankommende Elektron des Bündels legt beim Übergang von Luft in Wasser einen kürzeren Weg zurück, als es während der Zeit τ in der Luft gemacht hat und zwar umgekehrt proportional der Geschwindigkeitsabnahme in beiden Medien; und die nacheinander ankommenden Elektronen machen bis zum Ablauf von τ entsprechend kleinere Wege im neuen Medium. Die in gleicher Phase stehenden Elektronen befinden sich dann nicht mehr in einer Ebene, die senkrecht steht zur ursprünglichen Richtung des Lichtstrahlenbündels, während die Bewegungsrichtung noch dieselbe bleibt. Dann sind die Elektronen in dieser senkrechten Ebene nicht mehr in gleicher Phase und stören sich in ihren Bewegungen gegenseitig, wenn die Schraubenbewegung des einen in das Nachbargebiet des anderen übergreift. Nun läßt die Flut der nachströmenden Elektronen die Störungen und Stockungen der Bewegungen nicht zu. Ganz beseitigt können aber diese nur dadurch werden, daß sich die Elektronen gleicher Phase so zusammenordnen, daß ihre Bewegungen wieder in eine einzige Ebene fallen. Dazu müssen sie eine Drehung machen, die von den nachfolgenden Elektronen immer wieder erzwungen wird. Die Zeichnung ergibt dann für die Richtung des Licht-

strahls dieselbe Ebene, die Huyghens mit Hilfe der Tangentialebene seiner Ekw ermittelt und daraus folgt das Snelliussche Brechungsgesetz.

Es mag noch hinzugefügt werden, daß die dargelegte Auffassung auch die Möglichkeit voraussieht, daß gewisse Strahlen ungebrochen durch ein Medium gehen, auch wenn sie schief auf die brechende Fläche treffen. Dies wird der Fall sein bei allen Strahlen, deren Schraubenbahnen einen so schmalen Querschnitt ⊥ zur Bahnrichtung bestreichen, daß die Querschnitte benachbarter Bahnen sich unter keinen Umständen überdecken. Und wenn der Zusammenstoß der Elektronen mit der Materie den Querschnitt der Schraubenbahnen vergrößert, so muß es durch den Versuch möglich sein, nichtbrechbare Strahlen in brechbare überzuführen.

Nun kann man auch für die verschiedene Brechbarkeit der Lichtstrahlen einen Grund finden, während man bisher nur die Tatsache feststellen konnte, daß die brechbareren Strahlen die der kleineren Wellenlänge sind. Die Elektronen mit kleinerer Wellenlänge stoßen sich öfter an den festen Atomen, oder wenn sie durch die Atome dringen, reiben sich mehr an den Atomwänden, so daß auch ihre Geschwindigkeit im Verhältnis zu der der anderen mehr vermindert wird. Doch kann man sich auch vorstellen, daß bestimmte Atome so gebaut sind, daß die durch sie hindurchgehenden Strahlen, selbst wenn sie kurzwellig sind, doch eine geringere Reibung erleiden als langwellige, so daß damit anormale Erscheinungen erklärt werden könnten. Auch das Wiensche Verschiebungsgesetz des Lichtes nach dem Rot hin steht mit dieser Theorie in Übereinstimmung; denn die Reibung der Elektronen an den Medien, welche sie durchdringen, wird nicht nur ihre translatorische Geschwindigkeit vermindern, sondern auch die rotatorische verlangsamen, was nichts anderes heißt, als daß die Schwingungszahl in der Zeiteinheit abnimmt.

Wie man sich aber zu diesen Darlegungen stellen mag, das eine dürfte von allen Seiten zugestanden werden, daß der bekannte Foucaultsche Versuch nicht entscheidend ist, über Emissions- und Undulationstheorie zu entscheiden, und daß nunmehr die Bahn für die Emissionstheorie wieder frei gemacht ist. Nach ihr drängt aber alles hin, seitdem das Energieprinzip die Grundlage des Naturerkennens bildet.

Anhang.

142 Als Anhang zur Kritik von Einsteins Relativitätstheorie mag noch die Kritik eines Gedankenganges von Dr. Lämmel hinzugefügt werden, der sich das Ziel setzt, den Leser in das Verständnis von Einsteins Lehre einzuführen und demgemäß die Vorgänge beim Michelsonschen Versuche begreiflich zu machen. Da seine Schrift: „Wege zur Relativitätstheorie einen Absatz von 60 000 Exemplaren gefunden haben soll, so dürfte mancher den Inhalt dieses Buches kennen.

Die Bewegungen der beiden verschiedenen Lichtstrahlenbündel beim Michelsonschen Versuche vergleicht er mit den Bewegungen eines Schwimmers, einmal in ruhendem und dann in der Richtung Westost fließendem Wasser zwischen zwei Booten, die entweder in dem Wasser festliegen oder in der Richtung des fließenden Wassers mit dessen Geschwindigkeit fortgetrieben werden. Der Schwimmer soll von dem einen Boot nach dem zweiten schwimmen und von da nach dem ersten zurückkehren. Der Abstand der Boote ist a, die Geschwindigkeit des Schwimmers v_s, die des fließenden Wassers v_w. Es soll jedesmal die Zeit für das Hin- und Zurückschwimmen bestimmt werden.

Zunächst werden vier Fälle unterschieden. 1. Das Wasser ruht und die Boote ruhen. 2. Das Wasser ruht und die Boote bewegen sich mit v_s in der Richtung Westost. 3. Das Wasser fließt in der Richtung Westost mit v_w und die Boote ruhen. 4. Das Wasser und die Boote fließen in der Richtung Westost, beide mit der Geschwindigkeit v_w.

In jedem dieser vier Fälle hat der Schwimmer zwei Fahrten auf der Strecke a hin und zurück zu machen, einmal in der Richtung Westost und einmal senkrecht dazu. Die um a voneinander entfernten Boote in der ersten Richtung seien A und B in der zweiten A und C.

Im ersten Fall ist die Schwimmzeit von M von A nach B $t = \frac{a}{v_s}$ und zurück nach A gleichfalls $t = \frac{a}{v_s}$, so daß die Gesamtzeit $T = \frac{2a}{v_s}$ ist.

Im zweiten Falle, wenn M im ruhenden Wasser schwimmt in der Richtung AB, in der sich auch die Boote mit v_w bewegen, legt er in 1 Sek. v_s zurück, während sich B von ihm um v_w entfernt, so daß er sich B um $v_s - v_w$ nähert; demnach erreicht er B in $t = \frac{a}{v_s - v_w}$. Beim Zurückschwimmen nähert sich A dem M um v_w und M dem A um v_s; also beträgt die Annäherung in jeder Sekunde $v_s + v_w$, so daß M A in $t = \frac{a}{v_s + v_w}$ erreicht. Die Gesamtzeit ist dann $T = \frac{2a\,v_s}{v_s^2 - v_w^2}$

Bewegt sich dagegen M in der Richtung AC, senkrecht zu AB, während sich die Boote im Abstande a parallel AB bewegen, so muß er, um den kürzesten Weg nach C zu durchlaufen, mit v_s in der Richtung der Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks schwimmen, dessen eine Kathete a und die andere tv_w ist; dann nähert sich M in jeder Sekunde um $\sqrt{v_s^2 - v_w^2}$ der durch C gelegten Parallele zur Stromrichtung und erreicht das Boot C in der Zeit: $t = \frac{a}{\sqrt{v_s^2 - v_w^2}}$. Der Rückweg von C nach A nimmt die gleiche Zeit in Anspruch, so daß die ganze Zeit: $T = \frac{2a}{\sqrt{v_s^2 - v_{w\,2}}}$ ist. Demnach sind die Zeiten auf den beiden Wegen des zweiten Falles voneinander verschieden.

Im dritten Falle ruhen die Boote; dagegen fließt das Wasser mit v_w. Die Rechnung zeigt, daß sich bei der Bewegung in der Stromrichtung die Gesamtzeit aus denselben Summanden $\frac{a}{v_s + v_w}$ und $\frac{a}{v_s - v_w}$ zusammensetzt und daß auch senkrecht zur Stromrichtung wieder $T = \frac{2a}{\sqrt{v_s^2 - v_w^2}}$ ist; nur muß M in der Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks mit vs stromaufwärts schwimmen.

Es bleibt daher nur noch der vierte Fall zu besprechen übrig, in dem sich die Boote und das Wasser mit v_w bewegen. Beim Stromabwärtsschwimmen von A nach B hat M die Geschwindigkeit $v_s + v_w$, das Boot B v_w, daher nähert sich M in jeder Sekunde dem Boot B um v_s und erreicht es in $\frac{a}{v_s}$ Sekunden. Beim Zurückschwimmen hat M die Geschwindigkeit $v_s - v_w$, mit der er sich A nähert; zugleich kommt ihm A mit v_w entgegen, so daß die ganze Annäherung $v_s - v_w + v_w = v_s$ in der Sekunde beträgt; demnach dauert das Zurückschwimmen ebenfalls $\frac{a}{v_s}$ Sekunden, und die Gesamtzeit ist: $T = \frac{2a}{v_s}$. Bewegt sich dagegen M senkrecht zu AB von A nach C,

so steht er unter dem Einflusse von zwei Geschwindigkeiten v_s und v_w, die aufeinander senkrecht stehen, so daß die resultierende Geschwindigkeit die Größe $\sqrt{v_s^2 + v_w^2}$ hat, die jedoch nur eine Annäherung an C um v_s bewirkt. Er wird daher C in $\frac{a}{v_s}$ Sekunden erreichen und aus denselben Gründen auch auf dem Rückweg nach A in $\frac{a}{v_s}$ Sekunden gelangen, also die Gesamtzeit $T = \frac{2a}{v_s}$ gebrauchen.

Während der zweite und dritte Fall dasselbe Endergebnis haben, nämlich dieselbe Zeitendifferenz auf den Wegen AB und AC, haben auch der erste und vierte Fall das gleiche Ergebnis, nämlich die Unabhängigkeit der Zeit von der Richtung der Bewegungen. Diese letztere Übereinstimmung ist jedoch durchaus nicht auffällig; denn die Vorgänge in einem translatorisch bewegten System erfolgen in derselben Weise wie wenn das System ruhte.

Es fragt sich nun, mit welchem der vier beschriebenen Fälle der Michelsonsche Versuch zu vergleichen ist. In ihm trifft ein von der Sonne kommender oder auf der Erde erzeugter Lichtstrahl die Apparatur des Versuches, welche die Geschwindigkeit der Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne hat. Der Lichtstrahl ist dabei dem Schwimmer M zu vergleichen, die Apparatur den Booten und dem Wasser zusammen, wenn beide die Geschwindigkeit v_w haben. Also kann nur der Fall vier mit dem Michelsonschen Versuche in Vergleich gebracht werden. Dann sind die Zeiten für die Wege der getrennten Strahlenbündel des Versuches die gleichen; mit dem Zusammenfallen dieser Strahlenbündel kann demnach eine Interferenzerscheinung nicht verbunden sein; das wirkliche Ergebnis des Versuches, das Ausbleiben der Interferenzerscheinung, ist selbstverständlich.

Lämmel scheint anzunehmen, daß beim Michelsonschen Versuch der Fall 2 oder 3 vorliege; doch drückt er sich nicht klar darüber aus; und da er keine Rechnungen gibt, aus denen man seinen Gedankengang erschließen könnte, so ist es schwer, den Punkt nachzuweisen, wo die Quelle seines Irrtums liegt. Die Darlegungen auf Seite 37—39 seiner „Wege" sind völlig unwissenschaftlich und zeigen, daß ihm selbst die besprochenen Vorgänge nicht klar geworden sind. Ich habe ihn in einem Briefe auf seinen Irrtum aufmerksam gemacht, worauf er mir mitteilte, auf meine Einwendungen zurückkommen zu wollen. Wenn sich ihm dazu nicht vorher Gelegenheit bot, so mußte er diese finden bei einem Aufsatz in der Baseler Zeitung, in dem er unter seinem Namen einen Rückblick auf die Schriften für und gegen Einstein wirft. Er unterläßt dies jedoch, obwohl in einer Anlage dieses Aufsatzes, dem allerdings seine Namensunterschrift fehlt, mehrere Schriften, darunter auch meine: „Einstein, Michelson, Newton" besprochen wird.

Es kann kaum einem Zweifel unterliegen, daß Einstein Lämmels „Wege" kennt. Dann sind für mich nur zwei Möglichkeiten denkbar: entweder hat er Lämmels Darlegungen für richtig gehalten; dann hat er sie nicht mit dem Ernste nachgeprüft, den der Begründer einer neuen Theorie den Bemühungen anderer, seine Lehre zu stützen, zuwenden muß. Oder er hat die Achillesferse der Ableitung erkannt; dann war er verpflichtet, darauf aufmerksam zu machen.

10. Abschnitt.

Die Abweichungen meiner Naturauffassungen von denen anderer Forscher.

143 Meine in den vorhergehenden Abschnitten gegebene Auffassung der allgemeinen Naturvorgänge muß selbstverständlich auf die heftigsten Widerstände stoßen, weil sie, wenn sie zur Anerkennung gelangen sollte, sehr viele Forscher nötigen wird, ihre eigenen, ihnen liebgewordenen Vorstellungen aufzugeben. Und gerade in der letzten Zeit sind sehr viele neue Erklärungsversuche gemacht worden, als ein Zeichen, wie wenig die bisher geltende Lehre die Forscher befriedigt. Es gilt daher, zu diesen Erklärungsversuchen im allgemeinen Stellung zu nehmen, um den Streit der Meinungen auf gewisse Punkte zu konzentrieren.

Nun ist wohl als von jedem angenommene Tatsache anzusehen, daß in der Welt dauernd Veränderungen vor sich gehen, so daß ständig Energie verlagert wird. Diese kann aber nur freie sein, sei es, daß sie bisher immer frei gewesen ist oder aus dem gebundenen Zustand in den freien übergegangen ist. Dieser Ablauf der freien Energie vollzieht sich in Raum und Zeit, wie alle Beobachtungen zeigen. Demnach sind die Vorstellungen von Raum und Zeit bei Menschen und Tieren unmittelbar an die Verlagerung der Energie geknüpft. Sie sind das notwendige Postulat zum Verständnis der Naturvorgänge. Ohne sie kann die Natur nicht begriffen und ohne die Messungen in ihnen kann ein volles Verständnis der Vorgänge nicht gewonnen werden. Die Wirklichkeit von Raum und Zeit zu bezweifeln, hat gar keinen Sinn, weil man damit die Möglichkeit des Verständnisses überhaupt bestreiten müßte; und zu der Erkenntnis dieser Wirklichkeit sind wir auf Grund unserer Erfahrung gekommen, also a posteriori im Sinne Kants; dabei schreibt die Erfahrung dem Raume drei Dimensionen, der Zeit eine zu.

Daß wir das Vorhandensein und auch die Beschaffenheit von Raum und Zeit der Erfahrung verdanken, dafür spricht mit Sicherheit nicht nur die Tatsache, daß kleine Kinder nach der Sonne und dem Mond greifen, da sie wohl die Richtung des Reizes, nicht aber den Abstand des den Reiz sendenden Körpers kennen, und daß auch dem Erwachsenen die entfernten Gegenstände, zumal wenn sie bei bedecktem Himmel beobachtet werden, in eine Ebene zu fallen scheinen, sondern auch die Unterscheidung von links und rechts. Wenn Kant die Annahme bespricht, daß ein Auge, das vorher noch nichts gesehen hat, plötzlich nichts anderes als eine Hand, etwa die linke, erblickt und meint, daß dies Auge sofort erkennen könne, ob es eine rechte oder linke Hand sei, so irrt er sich. Wenn das Auge vorher nie den Unterschied in der Anordnung der entsprechenden, an sich gleichen kleinsten Teile der rechten und linken Hand gesehen hat, ist es gar nicht imstande, zu entscheiden, welche der beiden Händesorten es erblickt, natürlich vorausgesetzt, daß es weiß, daß der Gegenstand eine Hand ist. Erst wenn es viele rechte und linke Hände miteinander verglichen hat, besonders, wenn es den Versuch gesehen hat, den linken Handschuh über die rechte Hand zu ziehen, wenn es also die Erfahrung zu Rate gezogen hat, hat es die Fähigkeit gewonnen, rechts und links zu unterscheiden. Ja, die Wissenschaft hat sich sogar gezwungen gesehen, in die Definition symmetrischer, aber nicht kongruenter räumlicher Gebilde das aus der Erfahrung gewonnene Rechts und Links einzufügen. Demnach ist die wichtige Eigenschaft des Raumes, in ihm symmetrische Gebilde durch Drehung nicht allgemein zur Deckung zu bringen, nur aus der Erfahrung gewonnen, nicht a priori.

Auch die Tatsache, daß die drei Dimensionen des Raumes aufeinander senkrecht stehen, und daß kein Körper, in eine andere Richtung des Raumes gestellt, seine Länge, Breite und Höhe ändert, ist als eine Erfahrungstatsache des Raumes anzusehen. Nun gibt es aber eine physikalische Tatsache, die für die Rechtwinkligkeit der Dimensionen zueinander als bestimmter Grundeigenschaft spricht. Es ist dies das besondere Verhalten der von Leibnitz als lebendige Kraft bezeichneten Energie im Vergleich zur Wärme. Diese besondere Art kinetischer Energie läßt sich nach drei aufeinander senkrechten Richtungen in Komponenten zerlegen, die wieder reine lebendige Kraft sind, während bei jeder Zerlegung nach anderen Richtungen ein Teil der Energie in Wärme übergeht. Diese Tatsache ist durch Versuche festgestellt; sie folgt aber nicht aus der Vorstellung der Energie, sondern kann nur als Eigenschaft der Energie in einem Raume mit drei aufeinander senkrecht stehenden Dimensionen verstanden werden.

144 Wenn zwischen den Energien des Weltalls ein Gleichgewicht bestände, so daß keine freie Energie vorhanden wäre, dann würde allerdings keine Veränderung in der Natur mehr auftreten. Dann würde ein denkendes Wesen, wenn es bestehen könnte, weder Raum noch Zeit bemerken, da beide nur aus den durch die Verlagerung von Energie bedingten Veränderungen erschlossen werden können; aber damit würde der Schluß, daß dann Zeit und Raum nicht existierten, doch unberechtigt bleiben. Man nimmt an, daß auf dem Mond keine, uns gleich organisierten Wesen bestehen können, weil dort die zu unserer Erhaltung notwendigen Bedingungen fehlen. Es ist aber durchaus möglich, daß diese früher bestanden und daß dort Wesen gelebt haben, die die Veränderungen in der Welt zu beobachten vermochten. Dann werden sie auch a posteriori Raum und Zeit erkannt haben. Wenn sie nachher ausgestorben sind, sind ihre Gehirne zerstört, die in Raum und Zeit gedacht haben; aber Raum und Zeit sind nicht verschwunden; und die Beleuchtung der Erde durch die Sonne, vom Mond aus gesehen, wird noch in derselben Weise ablaufen, wie sie von den früheren Mondbewohnern beobachtet worden ist. Raum und Zeit sind unabhängig davon, ob sie von einem Denkorgan zum Bewußtsein gebracht werden oder nicht.

Hier kommen wir zu der zweiten Bedingung, die erst ermöglicht, die Vorstellung von Raum und Zeit zu bilden, das Vorhandensein eines Gehirns, das aus den wechselnden Reizen der Außenwelt das Neben- und Nacheinander der Erscheinungen aufzufassen vermag. Das Vorhandensein und die Tätigkeit dieses Gehirns ist aber wieder nur möglich beim Fehlen des Energiegleichgewichts im Weltall. Denn einerseits würde es sonst keine Reize empfangen; anderseits setzt seine Organisation voraus, daß in ihm Energie verlagert wird. Denn die Reize müssen von den Sinnesorganen nach bestimmten Stellen des Gehirns fortgeleitet werden, wo sie zerlegt werden, um von da zu anderen Ganglien geführt zu werden, die das eigentliche Denkorgan bilden. Dazu wird Energie gebraucht, die dem Blute des Gehirns entnommen wird, die also im Falle des Weltenergiegleichgewichts nicht zur Verfügung steht.

Nach meiner Ansicht stehen die Ganglien, denen die zerlegten Reize zugeführt werden, mit anderen Ganglien in Verbindung, deren Reizung das erweckt, was wir eine bestimmte Vorstellung nennen. Diese Vorstellung ist mit dem Ganglion verbunden, weil die Sinnesreize, die etwa ein plötzlich auftretender Wolf bei unseren Vorfahren auf die verschiedenen Sinnesorgane ausgeübt hat, immer dasselbe Ganglion im Denkorgan getroffen hat, so daß durch Gewöhnung und Vererbung die Reizung dieses Ganglions die Vorstellung des Wolfes erweckt hat. Dann ist das plötzliche Erschrecken

eines Pferdes beim Gebrüll eines Löwen, obwohl es vorher noch nie einem solchen Tiere begegnet ist, einem Ganglion zu verdanken, welches im Pferde durch Vererbung noch erhalten geblieben ist, und das anderseits mit allen Muskeln, sei es direkt oder durch Vermittlung anderer Ganglien, verbunden ist, die die zweckmäßigen Bewegungen auslösen, um der drohenden Gefahr zu begegnen. Das Denken ist dann nichts anderes als der Ablauf eines Reizes im Denkorgan von einem Ganglion zu einem oder mehreren anderen durch die sie verbindenden Nervenfäden: und je gangbarer der Weg durch diese Nervenfäden geworden ist, um so leichter wird der Gedanke produziert. Diese Betrachtungen zeigen, daß jedes Denken an eine Energieverlagerung geknüpft ist und gleichzeitig, daß ein Denken ohne das Vorhandensein eines Gehirns als Denkorgan nicht vorstellbar ist.

145 Für das Gebundensein der Energieverlagerung an Raum und Zeit hat Arvid Reuterdahl, St. Paul, dessen Vater ein geborener Schwede war, die Bezeichnung space-time-potential gebildet. Ich nehme dabei an, daß er unter potential die Energie verstanden hat, da bekanntlich das Potential nach dem alten Sinne eine bestimmte Arbeit, also eine Energie ist. Nach ihm ist das ganze Universum ein einziges System; und eine Änderung in der Zusammenordnung der Massen zueinander an einer Stelle ruft eine Verschiebung in der Verteilung der Energie in den benachbarten Teilen hervor. Dann muß diese Änderung von Anfang an dagewesen sein; und die gesetzmäßigen Änderungen in der Welt sind für ihn der sichtbare Beweis für das Wirken eines die Welt lenkenden Gottes. Wenn man von diesem letzteren Schlusse absieht, ist seine Vorstellung von der meinigen nicht sehr verschieden, da sie im Grunde darauf hinausläuft, daß beständig Energie im Weltraum verlagert wird, was nur in Raum und Zeit erfolgt. Nur beruht nach meiner Ansicht diese Veränderung auf der zwangsweise erfolgenden Einwirkung der den Weltraum erfüllenden Elektronen auf die im Weltraum zusammengelagerten Massen, wodurch Energieverlagerungen von den Elektronen auf die Massen und umgekehrt immer an denjenigen Stellen hervorgerufen werden, wo verschiedene Massen einander genähert sind, und daß sich an diesen Stellen das Energiegleichgewicht im Raume bald wieder herstellt, wenn sich die Massen davon hinreichend weit entfernt haben. Meine Elektronenvorstellung gibt daher den ausreichenden Grund für die Bewegungen der Weltkörper, so daß sich der Reuterdahlsche Schluß auf einen weltordnenden Geist für die wissenschaftliche Betrachtung erübrigt.

Reuterdahls Ansicht steht in naher Beziehung zu Einsteins Ideen; und da der erstere seine Gedanken schon längere Zeit vor Einstein, im Iahre 1902 entwickelt hat, hat er offenbar die Priorität vor diesem. Er behauptet aber weiter, daß Einstein sein Raum-Zeit-Kontinuum erst gebildet habe, nachdem ihm die Prägung seines space-time-potential bekannt geworden sei. In diesen Streit mich einzumischen, liegt mir fern. Wohl aber darf die Frage aufgeworfen werden, welche Vorstellung, die von Reuterdahl oder Einstein, dem Stande der Wissenschaft mehr entspricht. Einstein schließt aus seiner Bezeichnung des Kontinuums die Energie aus, während Reuterdahl eine unmittelbare Verbindung zwischen Raum, Zeit und Energie postuliert. Es wird jedem Naturforscher einleuchten, daß die letztere Auffassung unseren Vorstellungen näher steht als die erstere. Man kann sagen, daß jene von einem echten Physiker, diese dagegen von einem Mathematiker gefaßt werden konnte, dessen Gedankenwelt sich von den bisherigen Vorstellungen von Raum und Zeit unabhängig machen will. Im Grunde kommt Einsteins Gedanke darauf hinaus, daß ein Planet zwangsweise eine Kurve

verfolgt, nicht infolge einer Energieverlagerung, sondern weil die von ihm — Einstein — konstruierte Kurve ihn dazu bestimmt.

146 Nun macht Reuterdahl aber in seinen Darlegungen die durch nichts gestützte Annahme, daß die Beziehungen zwischen Energie, Raum und Zeit die gleichen sind, ob die Energieverlagerungen im Sonnenplanetensystem vor sich gehen oder in den übersolaren, also übersinnlich-großen oder auch in den untersinnlich-kleinen Gebieten. Da die Bewegungen der Körper im Sonnengebiet nach seiner Anschauung durch Anziehungskräfte geregelt werden, so nimmt er für die beiden anderen Gebiete dasselbe an. So bleibt er bei den Kräften stehen, die in die Ferne wirken, und die etwas von der Energie Verschiedenes sein sollen. Wenn meine Auffassung der Gravitation richtig ist, so wird die Planetenbahn durch Aufnahme von Energie auf dem Wege zum Perihel und Abgabe auf dem Wege zum Aphel bestimmt; und der Grund für diese Aufnahme und Abgabe ist in der ablenkenden Wirkung der Massen auf das Durchdringen der Elektronen durch sie zu suchen. In den übersolaren Gebieten ist die Entfernung zweier Sonnensysteme so groß, daß die von den Massen dieser Systeme wechselseitig aufeinander ausgeübten Störungen des Energiegleichgewichts der Elektronen zu klein sind, um auf die Bewegungen der Systeme einzuwirken. Dagegen in den untersinnlich kleinen Gebieten sollen nach dem Reuterdahlschen Prinzip die das Atom umkreisenden Elektronen aus sich heraus die durch nichts begreifbaren Bewegungen in Elipsen ausführen, welche in Sonnengebieten den zusammengeballten Massen durch die Aufnahme und Abgabe von Elektronenenergie aufgezwungen wird. Die geradlinige Bewegung der Elektronen mit ihrer Geschwindigkeit von 300 000 km im Weltenraum soll plötzlich übergehen in eine krummlinige in Form einer Ellipse, die im untersinnlich kleinen Gebiete ein Atom umkreisen soll; und es wird nicht der geringste Versuch gemacht, diese plötzliche Veränderung der Bewegung auch nur annähernd durch einen ähnlichen Vorgang in der Natur verständlich zu machen. Ebenso soll ein Elektron, das ein Atom umkreist wie in den glühenden Körpern, aus denen Lichtquanten abgesondert werden, plötzlich in die gradlinige Bewegung von 300 000 km übergehen. Solange dieser Vorgang nicht als mechanisch möglich erfaßt werden kann, ist er als ein unbegreifliches Wunder anzusehen, das aber in der Wissenschaft keinen Platz haben darf.

147 Nur zwei Möglichkeiten, eine Erklärung zu suchen, scheinen mir vorzuliegen: entweder ist die Energie des Elektrons bei seiner Bewegung um das um einen idealen Mittelpunkt schwingende Atom des glühenden Körpers schon ebenso groß gewesen, wie sie das Elektron nach dem Verlassen aufweist; oder sie ist ihm von dem Atom im Augenblick der Loslösung übertragen worden. Im ersten Fall muß das Elektron die Ellipsenbahn bereits mit 300 000 km durchlaufen und dabei eine „Zentrifugalkraft" entwickeln von der Größe $\frac{m v^2}{\varrho}$, wo ϱ der Radius vector der Bahn ist, und die nur durch ständige Aufwendung von Energie unschädlich gemacht werden kann. In Wirklichkeit ist diese Energie selbst $= \frac{m v^2}{\varrho}$, was man sofort einsieht, wenn man hier ϱ nicht als Strecke, sondern als Maßzahl einer Strecke auffaßt. Nun ist die Masse des Elektrons klein, die Lichtgeschwindigkeit v sehr groß, $3 \cdot 10^{11}$ mm per Sekunde, so daß mv^2 eine sehr beträchtliche Größe darstellt. Ferner ist ϱ in mm sehr klein und zwar kleiner als der halbe Abstand zweier Atome eines glühenden Körpers, da sich sonst die Bahnen der Elektronen benachbarter Atome gegenseitig stören könnten. Der mittlere Abstand zweier Gasmolekeln bei Normaldruck und -temperatur wird zwi-

schen 3 und 4 Millionstel mm gerechnet; demnach muß der halbe Abstand kleiner als $2 \cdot 10^{-6}$ mm sein. Die Massen des festen Körpers liegen mindestens 1000 mal so dicht; demnach sind die Abstände der kleinsten Teile 10mal so dicht und geringer als $2 \cdot 10^{-7}$ mm. Da nun das sehr große mv^2 durch die sehr kleine Maßzahl $2 \cdot 10^{-7}$ dividiert werden muß, so erhält man als „Zentrifugalkraft" eine ganz ungeheure Größe, die einfach unvorstellbar ist. Zu demselben Ergebnis gelangt man, wenn man die Zahl der Umläufe des Elektrons um sein Kernatom in 1 Sekunde berechnet. Der Weg des Elektrons in 1 Sek. ist 3.10^{11} mm, die Länge eines Umlaufes $= 2\pi\varrho$, wo ϱ den mittleren Radius vector bedeutet, also kleiner als $12{,}56\,10^{-7} < 1{,}5\,10^{-6}$; demnach muß das Elektron das Atom in 1 Sek. mehr als $2 \cdot 10^{17}$ mal umlaufen. Diese Folgerung auf Grund der uns bekannten Daten zeigt, daß die Annahme unhaltbar ist, die Geschwindigkeit des Elektrons wäre bereits vor seiner Absonderung aus dem Atom der Lichtgeschwindigkeit gleich gewesen. Dabei darf auch noch auf den folgenden Punkt hingewiesen werden. Wenn nämlich die Elektronen in solch verschwindend kleiner Zeit ihren Umlauf um das Atom vollziehen, wie kommt es dann, daß sie, wenn sie sich aus den benachbarten Atomen loslösen, unter sich parallele Bahnen einschlagen? Bei der riesigen Winkelgeschwindigkeit, mit der sie um ihre Atome zirkulieren, kann man doch, ohne besondere einleuchtende Gründe zu kennen, nicht erwarten, daß sie aus den benachbarten Atomen sich alle genau gleichzeitig absondern; vielmehr müßten sie der Wahrscheinlichkeit nach zu verschiedenen Zeiten sich trennen und dann in den verschiedensten Richtungen ihre Atome verlassen, was aber durch die Beobachtung nicht bestätigt wird. Schließlich fehlt auch jede Begründung, weshalb das zirkulierende Elektron die gradlinige Bahn aufsucht und weshalb ein in gerader Linie dahinsausendes plötzlich eine Kreisbahn einschlägt.

Es bleibt nun übrig, die zweite Möglichkeit zu betrachten, daß dem Elektron die Lichtgeschwindigkeit erst beim Austritt aus dem Atom erteilt wird. Die erforderliche Energie kann dann nur dem Atom entzogen werden, also seiner kinetischen Energie. Die glühende Masse, aus der die Elektronen ausgestoßen werden, wird selbst für die Sonne nur auf 6000 °C angenommen. Eine höhere Temperatur ist auch kaum wahrscheinlich, da sie den Übergang vom flüssigen zum gasförmigen Zustande ermöglichen würde; und man darf wohl die Sonne ansehen als sich befindend in einem Gleichgewichtszustande von sich von ihr ablösenden und an sie wieder anlagernden Atomen des Weltraumes. Nun hat ein fester Körper einen größeren Energiemangel als ein flüssiger und dieser als ein gasiger und weiter als ein solcher im Atomzustande. Daher kann die Energie in einem nicht gasförmigen Zustande nicht so groß sein, als wenn alles als Gas auftreten würde. Nun kann man die Geschwindigkeit eines Gases berechnen, auch für eine Temperatur von 6000° C. Wasserstoff hat bei Normaldruck und Temperatur die mittlere Geschwindigkeit von 1,844 km/Sek., bei 6000° $1{,}844\sqrt{1 + \frac{6000}{273}} = 8{,}84$ km/Sek., die übrigen Gase mit größerem Molekulargewicht entsprechend weniger. Da Wasserstoff bei dieser Temperatur im Atomzustande ist, wächst die Geschwindigkeit des Atoms auf 12,5 km/Sek. Wie soll aber dieses Atom imstande sein, einem in ihm mitschwingenden Elektron die Geschwindigkeit von 300 000 km zu verleihen? Man könnte nun vermuten, daß das H-Atom seine ganze Energie auf das Elektron übertragen könnte; und wenn man annähme, daß sich von Anfang an die Energien im Verhältnis der Massen auf Atom und Elektron verteilten, dann würde, wenn sich die Masse des Atoms zu der des Elektrons wie 1800 : 1 verhält, die Geschwindigkeit des Elektrons

sich im Verhältnis $\sqrt{1801} : 1$ vermehren und auf 530 km steigen, aber nicht auf die Lichtgeschwindigkeit. Aber dieser Vorgang ist gar nicht möglich; denn 1. würde das Atom fast seine ganze Energie verloren haben, was mit dem Energieprinzip nicht vereinbar ist, nach welchem in der Natur immer nach einem Energiegleichgewicht gestrebt wird; daher hätte die auf das Elektron übergetretene Energie sofort zurückfließen müssen; und 2. hätte zwischen Atom und Elektron eine Berührung stattfinden müssen, damit die Energie übertreten könnte. Aber diese Berührung ist durch die Annahme ausgeschlossen, daß das Elektron auf einer Planetenbahn das Atom umkreist. Wenn aber in Wirklichkeit zwei Energieträger zusammenstoßen, so gleichen sich die Energien so weit aus, daß die kleinsten Teile derselben eine gemeinsame Geschwindigkeit erhalten, sei es in Form von Wärme oder von translatorischer Geschwindigkeit. In jedem Fall wird eine Mittelgeschwindigkeit und keine über die Geschwindigkeit der beiden Träger hinaus gesteigerte gewonnen. Eine größere als die ursprüngliche Geschwindigkeit kann nur auf Grund der geometrischen Zusammensetzung der Geschwindigkeiten erzielt werden. Es müßte daher der Nachweis geführt werden, daß in dem Planetensystem von Atom und Elektron Vorgänge auftreten, die sich nach diesem Gesetze abspielen.

Nach diesen Darlegungen ist es verständlich, daß ich mich den Reuterdahlschen Vorstellungen nicht anschließen kann und daß ich ebenso die Bohrschen Versuche, durch Atommodelle ein Verständnis der Vorgänge in den untersinnlich kleinen Gebieten zu gewinnen, für verfehlt halte. Alle von mir hervorgehobenen Schwierigkeiten bei Reuterdahl und Bohr fallen aber weg, wenn man sich meiner Ansicht anschließt. Dann haben die Elektronen die Geschwindigkeit von Anfang an in sich, die sie in der Lichtbewegung aufweisen. Der fundamentale Irrtum der genannten Forscher beruht wieder darin, daß beide sich gegenseitig anziehende Kräfte voraussetzen, anstatt die Erscheinungen auf Verlagerung von Energie zurückzuführen.

Aber die Untersuchungen von Bohr und anderen führen zu Vorstellungen, die im Grunde von den meinigen nicht abweichen. Sie schreiben der Bewegung der Elektronen um die Atome zwei Freiheitsgrade vor. Auch meinen Elektronen kommen beim Durchdringen der Massen zwei Freiheitsgrade zu. Einmal kann ihre translatorische Geschwindigkeit infolge der Reibung in den Atomen abnehmen und gleichzeitig ihre rotatorische; von der ersteren hängt die Lichtbrechung ab, von der letzteren die Verschiebung des Lichts von den kurzwelligen zu den langwelligen bei der Durchdringung der Massen, also das Wiensche Gesetz.

148 Eine weitere Frage bezieht sich auf die Verteilung der Energie im Weltraume. Auch bei ihrer Beantwortung spielt der Energiemangel in festen und flüssigen Körpern eine wichtige Rolle. Wenn dieser den festen und flüssigen Zustand bestimmt, dann ist die in den Weltkörpern aufgespeicherte Energie an eine gewisse Grenze gebunden; und es scheint, wenn diese Energie auf den ganzen Weltraum gleichmäßig verteilt gedacht wird, die in der Volumeinheit enthaltene Energie sehr gering zu sein in Rücksicht auf die gewaltigen Abstände, die zwischen den Sonnen bestehen, vorausgesetzt, daß man den Zwischenraum nicht mit Energieträgern erfüllt ansieht. Sowohl die Vorstellung, daß dieser Zwischenraum ganz leer sei, wie auch die, daß ein masseloser Äther ihn gleichmäßig ausfüllt, schließt die Annahme aus, daß in ihm Energie aufgespeichert sei. Ganz anders ist die Sache anzusehen, wenn meine Ansicht als richtig anerkannt wird, daß der Weltraum dicht angefüllt ist von den mit 300 000 km Geschwindigkeit dahinsausenden, aus allen Richtungen

kommenden und nach allen Richtungen gehenden Elektronen. Wenn die Masse jedes einzelnen Elektrons auch nur sehr gering ist, so ist diese Energie auf Grund der kolossalen Geschwindigkeit ganz gewaltig. Wenn die Lichtstrahlen nichts anderes sind als Bündel parallel gerichtet sich bewegender Elektronen, die hintereinander in so gedrängter Fülle aufeinander folgen, daß ihre Einwirkungen auf unser Auge nicht als intermittierend, sondern als kontinuierlich empfunden werden, so mögen sie den Raum ebenso dicht oder noch dichter erfüllen, als die Molekeln der Luft es an der Erdoberfläche tun. Nehmen wir beide Zahlen der Luftmolekeln und der Elektronen in 1 cbm als gleich an, dann besitzt ein Elektron an Masse zwar nur den 50 000sten Teil einer Luftmolekel, aber weist eine Geschwindigkeit auf, die annähernd 700 000mal so groß ist. Dann ist die kinetische Energie des Elektrons fast 10^7mal (genau $8{,}66\ 10^6$) so groß wie die einer Luftmolekel. Dann muß jeder cbm des Weltraumes in jedem Augenblick eine annähernd 10^7mal so große Energie enthalten als 1 cbm Luft an der Erdoberfläche. Berechnet man dann die Energie der Elektronen in dem die Sonne umgebenden Raume bis zur Mitte der Abstände von den nächsten Fixsternen und bringt sie zum Vergleich zu der in den Massen des Sonnensystems enthaltenen kinetischen Energie, die durch Schätzung zu ermitteln ist, so muß die erstere die letztere in einer für uns nicht vorstellbaren Größe überragen. Wir müssen uns daher an die Vorstellung gewöhnen, daß die in den Massen des Sonnensystems enthaltene lebendige Kraft und Wärme verschwindet gegenüber der Elektronenenergie, die in dem das Sonnengebiet erfüllenden und umgebenden Gebiet aufgespeichert ist.

Diese Vorstellung wird aber von der Wissenschaft gerade jetzt um so schwieriger aufgenommen werden, als zurzeit die Tendenz der herrschenden Führer gerade darauf hinausgeht, in die festen Massen möglichst große Mengen Energie zu legen und daneben den Weltraum als ganz leer zu betrachten; und zwar sollen in den festen Körpern die größten Mengen Energie aufgehäuft sein, weniger in den flüssigen, in den Gasen usw., während meine Darlegungen gerade zu der entgegengesetzten Auffassung führen. Den Anstoß zu dieser Gedankenrichtung hat das Bestreben gegeben, die im Radium scheinbar steckende Energie zu erklären. Daß dieser Erklärungsversuch entbehrlich ist, habe ich Seite 140 nachgewiesen. Er ist aber überhaupt nicht als Erklärung anzusehen, solange dunkel bleibt, warum die im Radium aufgespeicherte Energie nicht schon längst abgeflossen ist, um das sonst überall aufgesuchte Energiegleichgewicht herzustellen. Hier liegt ein Widerspruch vor zwischen der von der herrschenden Wissenschaft aufrecht erhaltenen Anschauung Clausius', daß die Entropie der Welt einem Maximum zustrebe, und der Ansicht, daß auf einem festen Körper unbegrenzte Energiemengen enthalten seien, die zwar allmählich abfließen, aber doch das Energiegleichgewicht nicht sofort aufsuchen, obwohl sie es könnten. Alle diese Theorien müßten doch den Mechanismus angeben, der das Abfließen verhindert; aber sie empfinden gar nicht das Bedürfnis, diesen Mangel zu beheben. Sie dürfen nicht darauf hinweisen, daß auch die Wärme im Innern der Erde sehr hoch sei und doch nur langsam nach der Oberfläche ströme; und das Gleiche könne von der Radiumenergie gelten. Aber die Wärmebewegung durch Leitung geht über große Strecken langsam vor sich, da ihre Geschwindigkeit der Temperaturdifferenz benachbarter Massen proportional ist. Dagegen die Radiumenergie ist Strahlenenergie und muß daher eine große Translationsgeschwindigkeit in sich enthalten. Warum folgt sie dieser großen Geschwindigkeit nicht, um sich auf einmal zu entfernen?

149 Bis zum Ende des vorigen Jahrhunderts betrachtete man die Axiome der

Erhaltung der Masse und der Energie als physikalische Wahrheiten, die durch die sorgfältigsten Untersuchungen begründet worden sind. Im Grunde genommen ist das erste Axiom nur ein Teil des Inhalts des zweiten. Denn jede Energie ist an einen Masseträger gebunden; nur kann die Energie auf ihm zunehmen oder abnehmen, während die tragende Masse unverändert bleibt; dabei ist gleichgültig, ob diese ein Elektron, ein Atom, eine Molekel oder auch eine ganze Weltkugel ist. Wenn nun die Energie unzerstörbar ist, so muß es auch die Masse sein, da keine Masse dauernd ohne Energie sein kann. Man darf wohl als theoretisch denkbar ansehen, daß ein Massenteilchen für den Augenblick seine ganze Energie verloren haben könnte; dann müßte es aber in verschwindend kurzer Zeit durch Leitung oder Strahlung neue Energie aufnehmen. So sind Masse und Energie unwandelbar aneinander geknüpft; und man kann sich gar nicht vorstellen, daß Masse im Weltraum verschwinden oder neu auftreten könnte, es sei denn, daß auch die Energie mit verschwände. Aber in diesem Fall würde jede Möglichkeit des Verständnisses der Naturvorgänge verloren gehen. Nun ist auch ein ernster Versuch, das Verschwinden von Masse und Energie nachzuweisen, bisher gar nicht gemacht worden. Sondern es sind nur auf die willkürliche Annahme, daß die Masse an sich veränderlich sein möchte wie etwa die Geschwindigkeit, Rechnungen aufgebaut worden, deren Interpretation dann zu nichts als Fehlschlüssen führen konnte. Wie eng Masse und Energie in Verbindung miteinander stehen, ergibt sich schon daraus, daß die erstere nur durch die Verlagerung von Energie erkannt werden kann, welche ja die einzige Möglichkeit der Veränderung des Naturzustandes ist, nämlich durch die Wage, die nur die Verlagerung zweier Gravitationsenergien zum Vergleich miteinander bringt. Man setzt die Massen diesen Wirkungen proportional. In der Annahme dieser Proportionalität steckt eigentlich auch die der Unveränderlichkeit der Masse; denn wenn die Energieverlagerung dieselbe bleibt, die die Gravitationserscheinung verursacht, kann der Träger, der sie aufnimmt, sich nicht geändert haben.

Es ist nun auffällig, daß gerade jetzt die Unveränderlichkeit der Masse lebhaft bestritten wird, während die der Energie zunächst noch unbestritten zu sein scheint; und noch auffälliger ist es, daß zwei Männer, die sonst als die schroffsten Gegner in der Auffassung des Naturgeschehens auftreten, in diesem Punkte, wenn auch nicht ganz einig sind, doch darin übereinstimmen, daß m keine absolute Konstante mehr sein soll, nämlich Einstein und Lenard.

150 Lenard hat darüber seine Ansicht in der Schrift: „Äther und Uräther, zweite Auflage,“ dargelegt und dabei den Nachweis zu führen gesucht, daß die Folgerungen, die Einstein über bestimmte Naturvorgänge aus seiner Relativitätstheorie abgeleitet hat, auch mit Hilfe einer Unterscheidung zwischen einem an die Massen des Weltalls gebundenen Äther und einem von dem Vorhandensein von Massen unabhängigen Uräther gewonnen werden können. Er hält demnach diese mathematischen Entwicklungen Einsteins vom physikalischen Standpunkte für einwandfrei und zeigt nur, daß sie auch aus seiner Auffassung erschlossen werden können.

Sowohl Einstein wie Lenard sprechen dem Lichtträger die Masse ab, Einstein vollständig und Lenard bedingt: denn er sagt, „daß der Äther zwar zur Materie gehörig, aber von ihr ebenso verschieden sei, wie das schon bisher gedacht wurde“. Wie man diesen Satz auch auffassen mag, jedenfalls wird der Träger der Lichtenergie, nach meiner Ansicht das Elektron, nicht als Masse betrachtet und folglich das Gesetz von der Zusammensetzung der Geschwindigkeiten nicht auf das Licht angewendet. Wie ich früher gezeigt habe, wird erst durch die Annahme der Masselosigkeit des Lichtträgers das Er-

gebnis des Michelsonschen Versuches unerklärlich, indem der Einfluß der Erdgeschwindigkeit in ihrer Bahn um die Sonne auf das Licht geleugnet oder wenigstens übersehen wird. Während Einstein die scheinbare Unverständlichkeit durch die Zeitverzerrung beseitigen will, versucht es Lenard durch die Unterscheidung des ruhenden Uräthers, in dem der Lichtstrahl von einem Stern zur Erde kommt, von dem mit der Erde wandernden Erdäther. Diese Vorstellung hat ihre besonderen Bedenken. Neben dem Uräther wird ein Sonnenäther angenommen, der sich weit über das Gebiet des Planetensystems erstrecken soll; die Erde führt daneben ihren besonderen Äther mit sich, der sich ebenso weit erstrecken dürfte, wie sich Störungsbewegungen in anderen Planetenbahnen unter dem Einfluß der Erde geltend machen. So darf man aus Folgerichtigkeit auf dem Mond einen Mondäther und jedem auf der Erde sich bewegenden Körper seinen ihm zugehörigen Äther zuschreiben. Alle diese Äther sollen sich teilweise überdecken und ihren Einfluß gesondert geltend machen; und dabei sollen sie die wesentlichste Eigenschaft der Materie nicht besitzen, daß zwei verschiedene Massen nicht an derselben Stelle sein können. Diese Annahmen muten uns als recht willkürlich an und scheinen von meiner Vorstellung ganz gewaltig abzuweichen; und doch stehen sie mit dieser in naher Verwandtschaft und würden mit ihr zusammenfallen, wenn Lenard statt der sich überdeckenden verschiedenen Äther in und um die bewegten Massen die durch die Massen hervorgerufenen, sich überdeckenden gegenseitigen Störungen des Energiegleichgewichts der Elektronen angenommen hätte. Wenn nun meines Erachtens die Lenardsche Annahme des Uräthers neben den Massenäthern nicht haltbar ist, so zeigt doch diese Betrachtung, daß seiner Hypothese eine gesunde, physikalisch richtige Ahnung zugrunde liegt, daß er sich aber darin irrt, daß er einer Massenverteilung des Äthers das zuschreibt, was die Massenverteilung im Elektronenmeer als Störung des Energiegleichgewichts hervorruft. Dagegen entbehrt Einsteins Annahme jedes Schimmers eines physikalischen Denkens.

151 Lenard schließt sich den Gelehrten an, die die Masse eines Stoffes als veränderlich ansehen, entgegen dem Lavoisierschen Axiom von der Erhaltung der Masse. Diese glauben auf die Unterstützung von Newton hinweisen zu dürfen; sie bedenken aber nicht, daß Newton ungefähr ein Jahrhundert vor Lavoisier gelebt hat und daher von dessen Feststellungen nichts gewußt hat, und daß anderseits der Begründer der Fluxionsvorstellung, die erst in dem Differentialquotienten ihren scharfen mathematischen Ausdruck gefunden hat, leicht geneigt sein konnte, diese Vorstellung von fließenden Geschwindigkeiten und fließenden Beschleunigungen auch auf Massen zu übertragen, solange keine widersprechenden physikalischen Tatsachen vorlagen. Daher scheint mir die Berufung auf Newton von keinem großen Gewichte zu sein. Im Gegenteil, die Wertschätzung, die dieser dem Versuch zuschreibt, läßt vermuten, daß, wenn er zu Lavoisiers Zeiten gelebt und dessen Forschungsergebnisse gekannt hätte, er einer der ersten gewesen wäre, die die Konstanz der Masse anerkannt hätten.

Lenard will an dem Axiom von Lavoisier nicht rütteln und macht daher die Annahme, daß die Massen bei Änderung ihrer Geschwindigkeit aus dem Weltraume Zusatzmassen aufnehmen oder abgeben, welche sie dort, frei von jeder Energie, antreffen, und will damit die Variabilität der Masse verständlich machen. Diese Zusatzmassen dürfen keine Energie enthalten, weil sonst die Anlagerung dieser Massen auch die Energie mit vermehren würde; das soll aber ausgeschlossen sein. Jedoch wenn solche energielosen Massen im Weltenraume vorhanden wären, so würden sie sich den nach allen Richtungen sich ausbreitenden Strahlen der Sonnen nicht entziehen können und

müßten daher auch nach der jetzt geltenden Naturauffassung Energie aufnehmen. Nun wird von Lenard aber weiter angenommen, daß bei abnehmender Geschwindigkeit die Energie tragenden Massen energielose Massen an sich anlagern und bei wachsender Geschwindigkeit wieder abstoßen, und zwar beides in dem Maße, daß die Energie auf dem Energieträger dieselbe bleibt. Wird die Lichtgeschwindigkeit von c auf c_1 herabgemindert, so soll m auf m_1 vergrößert werden, so daß $2\,E = mc^2 = m_1 c_1{}^2$ ist. Diese merkwürdige Annahme sichert allerdings das Gesetz von der Erhaltung der Energie; aber welcher Mechanismus sorgt dafür, daß diese Gleichung erhalten bleibt? Wer löst die Aufgabe, daß bei Abnahme der Geschwindigkeit c der Zuwachs von m genau so groß ist, daß die Energie unverändert bleibt? Bei dieser Herabminderung der Geschwindigkeit tritt doch eine Änderung im Naturzustande ein; und diese kann nur durch eine Verlagerung von Energie erreicht werden. Hier wird jedoch gefordert, daß bei der Änderung die Energie erhalten bleibt. Es muß doch von m, dem Träger der Energie, Energie abgeflossen sein, so daß das bleibende E_1 kleiner ist als E. Dann liegt nicht der geringste Grund vor, weshalb sich m geändert haben sollte. Anstatt anzunehmen, daß beim Abnehmen von c auf c_1 aus mc^2 $m_1 c_1{}^2 = 2\,E$ wird, muß als richtig angesehen werden, daß aus mc^2 $mc_1{}^2$ entsteht, so daß $E > E_1$ ist. Diese Vorstellung hat auch früher immer geherrscht.

Die neue Anschauung würde weiter auch dahin führen, daß diese Ersatzmassen überall dort, wo Lichtstrahlen hingelangen, also überall in der Welt, vorrätig sein müssen, damit in jedem Augenblick ein „passendes" Stück aufgenommen werden kann. Denn an den Massen unserer Atome dürfen sie nicht haften, da sie ja energielos sein sollen. Ferner müßten sie von solch winziger Kleinheit im Verhältnis zu einem Elektron, dem 50 000sten Teil einer Luftmolekel, sein, damit diese Zuwüchse als Differentiale der Massen gelten können. Zu dieser Schwierigkeit tritt noch die weitere hinzu, daß die von einem Lichtstrahl aufgenommene energielose und also auch bewegungslose Masse sofort die Geschwindigkeit des Lichtes aufweisen soll. Um in einem Geschütz die Geschwindigkeit der Kugel von 0 auf 1000 Meter zu bringen, ist ein erheblicher Teil einer Sekunde erforderlich. Um dem energielosen m die 300 000mal so große Geschwindigkeit zu verschaffen, muß eine recht bedeutende Zeit gebraucht werden; ehe das Teilchen dann die Lichtgeschwindigkeit gewonnen hat, ist der Lichtträger längst hinweggeflohen; und das Teilchen muß zurückbleiben. Und umgekehrt, wenn die Geschwindigkeit des Lichtträgers wieder zunimmt, dann müssen von ihm Massenteilchen in der erforderlichen Menge wieder abgestoßen werden, und zwar so, daß sie sofort die Geschwindigkeit Null aufweisen, um als energielos im Weltenraum zu verweilen. Wie ist es vorstellbar, daß die auf den Lichtträger und seine Zusatzmasse zusammen verteilte Energie sich plötzlich auf den Lichtträger allein zurückzieht, um die abgestoßene Zusatzmasse energielos zu machen? Es ist offenbar, daß Lenard dem Lichte zuviel zumutet, als daß durch seine Hypothese die Vorgänge mechanisch begreifbar gemacht werden könnten.

Es bleibt wohl nichts anderes übrig, als die alte Annahme, daß m eine dauernd unveränderliche Größe ist entsprechend dem Axiom von Lavoisier, aufrecht zu erhalten und sie in den Rechnungen als absolute Konstante zu behandeln. Dann ist die alte Formel richtig: $\frac{d\,(m\,v)}{dt} = m\frac{dv}{dt}$ und die neue ist falsch: $\frac{d(mv)}{dt} = m\frac{dv}{dt} + \frac{vdm}{dt}$. Ebenso ist falsch: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ und die Reihe:

$E = \frac{1}{2} m_0 v^2 (1 + \frac{3}{4} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \frac{v^4}{c^4} + \ldots\ldots)$. Beide Formeln werden erst dadurch wieder richtig, daß der Quotient $\frac{v^2}{c^2}$ gleich Null gesetzt wird.

152 Dann ist Lenard, allerdings nur probeweise, geneigt, den Lichtquanten, also den Elektronen, Schwere zuzuschreiben. Nach meiner Ansicht sind die Elektronenstöße die Ursache der Gravitationserscheinungen, also der Bewegung der einen Masse gegen die andere; dann können die Elektronen selbst keine Schwere zeigen, da ihre Bewegungen in einiger Entfernung von den Massen gleichmäßig nach allen Richtungen verteilt, also nicht nach einer bestimmten Richtung weder zueinander, noch zu den Massen orientiert sind. Demnach rufen die Elektronen die „Schwere" der Massen hervor, ohne selbst Schwere zu zeigen. Aber die Massen sind die mittelbare Ursache der Schwere, da diese durch deren Einwirkung auf die Elektronenverteilung bedingt wird.

Die Gleichung $m = \frac{E}{c^2}$ dient Einstein wie Lenard dazu, die Masse zu definieren. In der Gleichung ist E die Energie des Lichtquantums und c die Lichtgeschwindigkeit. Um sie abzuleiten, gehen beide von der sogenannten Bewegungsgröße mv aus. Welchen physikalischen Sinn kann man mit mv verknüpfen? Man kann m und v als benannte oder als unbenannte (Maß) Zahlen auffassen. Sind beide benannt, so ist das Produkt für uns unvorstellbar. Das Produkt aus sechs Klavieren und fünf Kamelen ist etwas Undenkbares. Sind beide unbenannt, so ist auch das Produkt unbenannt, also an sich keine physikalische Größe. Es bleibt also übrig, entweder m als unbenannte Zahl und v als eine Zahl von Geschwindigkeitseinheiten oder v als eine unbenannte Zahl und m als eine Zahl von Masseneinheiten anzunehmen. Dann ist mv im ersten Fall eine Geschwindigkeit, im zweiten Fall eine Masse. mv soll aber weder eine unbenannte Zahl noch eine Geschwindigkeit noch eine Masse sein; aber was sie sein soll, wird nicht gesagt. Es kann vielleicht eine Größe von physikalischer Bedeutung sein der Art, daß sie dem Produkt aus den Maßzahlen von Masse und Geschwindigkeit proportional ist. Dann müßte sie die Eigenschaft haben, bei veränderlichem m und v dieselbe Größe darzustellen, wenn die Produkte der Masseeinheiten zweier zugehöriger m und v dieselbe unbenannte Zahl ergeben, wenn also $m_1 v_1 = m_2 v_2$ ist. Eine derartige physikalische Größe ist die Energie, für welche die Formel gilt: $E = {}^1/_2 mv^2$. Zwei Energien sind gleich, wenn die Anzahlen der Energieeinheiten gleich sind, die nach den Formeln ${}^1/_2 m_1 v_1^2$ und ${}^1/_2 m_2 v_2^2$ ermittelt werden, oder wenn sich die Maßzahlen der Masseeinheiten in m_1 und m_2 umgekehrt verhalten wie die Quadrate der Maßzahlen der Geschwindigkeitseinheiten, die diese Energien aufweisen. Wenn nur kinetische Energien existieren, so sagt das Energieprinzip nichts anderes aus als dies. Soll demnach mv gleichfalls eine physikalische Größe sein, so muß neben der Gleichung ${}^1/_2 m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2$ zugleich die Gleichung bestehen: $m_1 v_1 = m_2 v_2$. Dies ist aber bei veränderlichem m und v nicht möglich; denn dann müßten allgemein zwei beliebige Massen sich gleichzeitig umgekehrt wie die ersten und die zweiten Potenzen der zugehörigen Geschwindigkeiten verhalten können. Demnach ist die Tatsache, daß $E = {}^1/_2 mv^2$ ist, zugleich mit der Erkenntnis verknüpft, daß mv keine physikalische, sondern nur eine Rechengröße ist, die also bei der Ermittlung physikalischer Wahrheiten nicht unmittelbar verwertet werden darf. Nebenbei bemerkt ist auch mv nicht als Kraft in dem unklaren Sinne, wie sie bisher aufgefaßt wurde, anzusehen; denn diese Kraft

ist der Masse und der Beschleunigung proportional gesetzt worden, während mv der Masse und der Geschwindigkeit proportional ist.

153 Mit dieser Rechnungsgröße mv wird nun in der Weise operiert, daß sie mit v multipliziert wird, wobei zweifelhaft ist, ob v als Maßzahl oder als Geschwindigkeit aufzufassen ist, und dann wird behauptet, daß dieses Produkt die Energiegröße darstellt. Schon O. E. Meyer in seiner Theorie der Gase schlägt diesen Weg ein. Er faßt den Gasdruck auf als hervorgerufen durch eine Vermehrung der molekularen Bewegung nach einer bestimmten Richtung, welche durch den Übertritt der Molekeln von einer Seite der Druckfläche nach der anderen bewirkt werde und durch die Abwanderung von Molekeln von der zweiten Seite nach der ersten, wobei beide Bewegungen sich in der Wirkung gegenseitig unterstützen und demnach den doppelten Druck von dem hervorrufen, der durch eine Bewegung allein bewirkt wird. Er übersieht dabei, daß der Abwanderung der Molekeln auf der einen Seite eine Zuwanderung von der anderen in gleicher Größe entspricht, so daß gar kein Überdruck auftreten kann. In der Tat herrscht in dem ganzen Gase ein Gleichgewicht der kinetischen Energie, so daß die Vorstellung eines Überdruckes mit den wahren Vorgängen im Gase nicht in Übereinstimmung zu bringen ist. Wohl kann der Druck des Gases in einem geschlossenen Gefäße größer oder kleiner sein als in der äußeren Umgebung dieses Gefäßes. Aber diese Druckdifferenz kann so lange keine Verlagerung von Energie bewirken, als die Umhüllung einen hinreichend großen Energiemangel aufweist, um ihre Festigkeit nicht zu verlieren. Meyer nimmt nun weiter an, daß alle zur Fläche senkrecht gerichteten Molekeln, die in der Zeiteinheit durch die Fläche gehen, aus einem Parallelopiped kommen, dessen Grundfläche die Fläche und dessen Höhe die Geschwindigkeit G der Gasmolekel ist; er setzt demnach voraus, daß keine einzige Gasmolekel auf ihrem Wege zurückgestoßen wird, was mit der Erfahrung in offenem Widerspruch steht. Durch diese Überlegung hat er in die Menge der in der Sekunde auf die Fläche stoßenden Molekeln die Geschwindigkeit v gebracht. Jetzt soll jede der v proportionalen Molekeln die Bewegungsgröße mv übertragen; dann kommt, abgesehen von einer Konstante, die Größe mv^2 heraus, die dann die Energie darstellen soll.

154 In ähnlicher Weise verfährt Lenard, der sich dabei auf die Überlegungen, die in der Gastheorie herrschen, bezieht. Er nimmt an, daß an der Oberfläche eines Lichtquanten ausstrahlenden Körpers eine in der Strahlrichtung liegende Kraft wirkt, deren Größe durch die in der Raumeinheit nächst der strahlenden Oberfläche enthaltene Strahlungsenergie NE/c dargestellt wird, wo N die Zahl der Lichtquanten, die in der Zeiteinheit entweichen, E die Energie des Lichtquants und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Man sollte erwarten, daß er nicht die in der Raumeinheit (ccm) enthaltene, sondern die in der Zeiteinheit aus der Flächeneinheit (qcm) der strahlenden Oberfläche austretenden Lichtquanten seiner Darlegung zugrunde gelegt hätte; dann würde deren Energie NE sein. Um den Nenner c in dem Ausdruck zu gewinnen, geht er vermutlich von dem Gedanken aus, daß, wenn das Lichtquant in der Zeiteinheit $c = 300\,000$ km $= 3.10^{10}$ cm durchläuft, von diesen auf die Länge eines cm nur $^1/_3\, 10^{-10}$ NE = NE/c fallen. Das würde auch richtig sein, wenn nur eine momentane Austrahlung in $^1/_3\, 10^{-10}$ Sekunde erfolgte. Wenn aber die Ausstrahlung längere Zeit erfolgt, dann werden in jedem Zeitabschnitt, auf die Zeiteinheit berechnet, infolge der dauernden Nachstrahlung NE Quanten durch die Flächeneinheit gehen. So hat Lenard durch eine nicht ausreichende Überlegung den Nenner c erschlichen, den er

ebenso wie O. E. Meyer nötig hat, um in seiner Rechnung zu der Energieformel mv^2 zu gelangen.

Nun schließt er weiter, daß nach Galilei die „Kraft" gleich dem Produkt aus Masse und Beschleunigung ist. Bezeichnet dann m die Masse des Lichtquants, N die Zahl der Lichtquanten, die in einer Sekunde ausgestrahlt werden, und a die Beschleunigung, so ist die „Kraft" $= N m a$. Für a setzt Lenard c und macht damit die Annahme, daß in 1 Sek. die Geschwindigkeit des Lichtquants von 0 auf 300 000 km gebracht wird. Wie kann man sich diesen Zuwachs an Geschwindigkeit erklären? Der strahlende Körper ist ohne sichtbare Geschwindigkeit; nur seine glühenden Atome machen heftige Schwingungen. Die Schwingungen müssen also senkrecht zu der strahlenden Fläche verlaufend angenommen werden. Die Massen der Lichtquanten sollen in den hin und her schwingenden Atomen ruhen, bis sie plötzlich sich absondern; sie sollen alle die gleiche Geschwindigkeit erhalten, ohne daß ein Versuch für das Verständnis dieser Tatsache gemacht wird. Fortdauernd sollen sich diese Massen mit dieser Geschwindigkeit absondern, ohne daß sich der Vorrat im strahlenden Körper erschöpft, solange er im Glühzustande verharrt. Aber nach Beseitigung dieses Zustandes, wenn auch der Körper noch eine hohe Temperatur hat, hört das Fortschleudern der Lichtquantenmassen auf. Ehe hierfür nicht eine annehmbare Vorstellung gegeben wird, eine andere wie die meinige, die ich in Abschnitt 8 dargelegt habe, hat die Lenardsche Hypothese keinen Wert.

Um nun schließlich zu der erstrebten Gleichung zu kommen, setzt er die Größe $\frac{NE}{c} = Nmc$ und gewinnt daraus $m = \frac{E}{c^2}$. Er hält sich zur Gleichsetzung berechtigt nach dem dritten Axiom von Newton: actio est par reactioni. Aber dieses Axiom kann als Grundgesetz nicht mehr bestehen bleiben, da es nicht allgemein gilt. Es ist bisher nur angewandt auf starre Körper; ob es auf Lichtquanten angewandt werden darf, die nach Lenard aus Äther bestehen, ist sehr fraglich. Nach Newton ist die actio eine „Kraft", an der die Quantität und die Richtung unterschieden wird; und sein Axiom sagt aus, daß mit einer Kraftwirkung nach einer bestimmten Richtung eine gleichgroße in entgegengesetzter Richtung verbunden ist. Neben der Kraftvorstellung haben wir die Energievorstellung ausgebildet. Aber das Wesen der Energie ist nur an die Quantität, nicht an die Richtung geknüpft. Dabei läßt sich zwar nicht leugnen, daß die Verlagerung der Energie an eine Richtung gebunden sein kann. Aber diese Richtung haftet gar nicht an der Energie als solcher, sie fehlt zunächst, wenn alle in dem Raum vorhandenen Energien im Gleichgewicht stehen. Ist dieses gestört, so lassen sich Niveauflächen gleicher Energie bilden. Dann fließt die Energie vom höheren Niveau senkrecht zur Fläche nach dem niedrigeren, bis sich ein neues Gleichgewicht gebildet hat. Bei folgerichtiger Durchführung der Energievorstellung kann kein Raum für die Kraft bleiben, höchstens als Hilfsvorstellung; und sicher kann das dritte Axiom Newtons nicht allgemein gelten und wird daher am besten gar nicht angewendet.

135 Wie wenig das Newtonsche Prinzip die Naturvorgänge aufzuklären vermag, mögen einige Beispiele zeigen. Der einfachste Weg, das mechanische Wärmeäquivalent direkt zu bestimmen, besteht in dem Herabfallen von Quecksilber von einer bestimmten Höhe in ein darunterstehendes Gefäß. Auf die in dem oberen, noch geschlossenen Gefäß befindlichen Quecksilberatome stoßen die, vertikal nach der Erde stoßenden Elektronen und geben beim Durchdringen der Atome eine geringe Menge von Energie ab, die aber das Quecksilber nicht nach unten treibt, weil der Energiemangel des feststehen-

den Gefäßes die Bewegung verhindert. Diese Energie wird auf die Erde übertragen und entweicht von ihr als Strahlung in den Weltenraum. Sowie aber der Verschluß des oberen Gefäßes an seiner unteren Seite geöffnet wird, wird das Quecksilber durch die von ihm aufgenommene Elektronenenergie nach unten getrieben nach den Gesetzen des freien Falles. Beim Auffallen der Quecksilbertropfen auf den Boden des Sammelgefäßes wird durch dessen Widerstand die gesamte translatorische Energie der Tropfen in ihrer Bewegung gehemmt und setzt sich in eine nach allen Richtungen wirkende Schwingungswucht um. Bei diesem Vorgang kommt nichts vor, was als actio und reactio im Newtonschen Sinne aufgefaßt werden kann. Es handelt sich nur um ein Übertreten von Elektronenenergie auf das Quecksilber und um eine Umformung des Bewegungszustandes dieser Energie. Betrachtet man ferner die Vorgänge bei einer gegen eine Panzerplatte abgeschossenen Kanonenkugel, die diese durchdringt, so besteht der sogenannte Widerstand der Platte in dem Energiemangel, der dieser Platte eigen ist. Zur Auffüllung dieses Mangels muß die Kugel von ihrer Energie eine ausreichende Menge abgeben und fliegt mit verminderter Energie weiter. Von einer Widerstandskraft, die in der Platte stecken soll, kann gar keine Rede sein; denn diese müßte von einer in der Platte aufgespeicherten Energie abgegeben werden wie bei einem Ringer, der den Druck seines Gegenkämpfers überwindet, wobei sich seine Energie in Wärme umsetzt. Hier von einer actio und gleichen reactio zu sprechen und damit den Vorgang erklären zu wollen, muß jeder Einsichtige als gekünstelt ansehen. Gleich ist nur die von der Kugel abgegebene Energie mit der von der Platte aufgenommenen Energie. Und wenn ein Gummiball zur Erde geworfen wird und wieder in die Höhe springt, so wird die letztere Bewegung nicht von einer „Kraft" bewirkt, die im Boden steckt und dort arbeitet, sondern von der in dem Balle steckenden kinetischen Energie, die ja ihrer Natur nach nicht vernichtet, sondern nur verlagert und umgeformt werden kann. Während die beim Fallen des flüssigen Quecksilbers aufgenommene Energie bei geeigneter Versuchsanordnung völlig in Wärme umgeformt wird, wird sie beim festen Gummiball infolge der Eigenart des Gummis als translatorische Energie erhalten und erleidet nur eine Richtungsänderung. Die Gleichheit aber von actio und reactio im Sinne Newtons wird nur erreicht, wenn 1. der Ball vertikal gegen die Wand geworfen wird und wenn er 2. vollkommen elastisch ist, wenn also beim Anprall an die Wand alle Energie translatorisch bleibt und nichts in Wärme übergeht. Aber auch in diesem Spezialfall ist die Gleichheit der Energie vor und nach dem Anprall das primäre, so daß er im allgemeinen Energieprinzip mit eingeschlossen ist. Demnach ist Newtons drittes Axiom für die Wissenschaft überflüssig. Seine Anwendung kann aber zu Trugschlüssen führen, wenn nicht gleichzeitig der Nachweis von der Erhaltung der Energie mitgeführt wird.

156 Es ist nötig, auf die Formel $m = E : c^2$ noch einmal zurückzukommen, in der E die als unzerstörbar angesehene Energie und c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten soll. Ändert sich demnach die Lichtgeschwindigkeit, so muß sich auch m ändern. Nun wird aber angenommen, daß sich die Lichtgeschwindigkeit unter keinen Umständen ändert, während der Ausgang des Michelsonschen Versuches nur mit einer durch die Erdgeschwindigkeit bedingten Veränderung der Lichtgeschwindigkeit einfach, d. h. allein mit Hilfe der bisher als gültig angesehenen Gesetze der Mechanik erklärt werden kann. Es ist nun auffällig, daß, obgleich in dieser Formel die Größen E und c unveränderlich sein sollen, trotzdem nicht gefolgert wird, daß auch m dieselbe konstante Größe behält. Jedenfalls liegt hier eine Folgeunrichtigkeit vor.

Ein weiteres Bedenken erhebt sich gegen die Forderung der Allgemeingültigkeit der Formel. Einstein leugnet, daß beim Lichte ein m der Träger der Energie sei, und Lenard erklärt, daß ein solches m von allen übrigen Massen verschieden sei. Es gibt demnach zwei verschiedene m, einmal das m Lavoisiers, das vermittelst der Wage bestimmt wird und die Voraussetzung unseres ganzen Verständnisses der Chemie ist, und ein metaphysisches m, welches das Ergebnis der Division von c^2 in E ist und von Null verschieden sein soll, während das entsprechende Lavoisiersche m nach Einstein Null, nach Lenard noch etwas ganz Unbestimmtes ist. Es ist daher auch kein Wunder, daß dieses metaphysische m noch einen anderen Namen, den der Trägheit, erhalten hat. Zwar wird einem nüchtern Denkenden nicht gerade einleuchten, daß der Quotient von Energie und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit etwas darstellen soll, mit dem die Vorstellung einer Energielosigkeit verknüpft ist, die von Trägheit schwer zu trennen ist. Viel eher würde man vermuten, daß die Trägheit das Ergebnis einer Subtraktion, also eine Differenz wäre. Und in der Tat tritt die Trägheit nur in Erscheinung, wenn zwei Körper mit verschiedenen Geschwindigkeiten aufeinander stoßen; haben sie gleiche Geschwindigkeiten in Größe und Richtung, wirkt keiner auf den anderen hemmend ein. Und die Trägheit währt so lange, bis beide Körper die gleiche Geschwindigkeit angenommen haben, indem der Körper mit größerer Energie die erforderliche Menge auf den mit kleinerer Energie übertragen hat. Das Maß der Trägheit ist dann die abgegebene, bzw. aufgenommene Energiemenge. Diese hängt aber nicht von der Lichtgeschwindigkeit, sondern von den Massen und Geschwindigkeiten der zusammenstoßenden Körper ab. Einsteins Trägheit ist daher auch nur als metaphysisch zu bewerten. Aber beide m sind dann scharf voneinander zu trennen, das einfache, durch die Wage jedem anschauliche m und das nebelumflossene m Einsteinscher Prägung, mit dem das von der Wirklichkeit losgelöste Gedankenspielwerk die ausschweifendsten Vorstellungen verbinden kann. Aber das erstere wird sein Bürgerrecht in der Wissenschaft auf die Dauer allein behaupten.

Allerdings ist das m der Wage für uns auch insoweit transzendental, als es uns, wie jede Messung, nur durch eine Energieverlagerung zugängig wird, nicht durch sich selbst. Wir trennen zwei m gleich, die auf beiden Seiten der Wage beim Durchgang der Elektronen durch sie die gleichen Energiemengen aufnehmen. Dabei wissen wir über die Vorgänge der Elektronen in den Atomen zur Zeit nichts. Anderseits aber wissen wir, daß bei diesen Massen, wenn auf sie andere Energieübertragungen als durch Gravitation ausgeführt werden, die berechneten und beobachteten Wirkungen übereinstimmen, daß bisher wenigstens keine merklichen Abweichungen festgestellt worden sind. Daraus darf man den Schluß ziehen, daß die Gravitationswirkungen die Größe der Masse eindeutig bestimmen. Dann ist die Lavoisiersche Masse die Masse an sich; sie ist auch der Träger der Energie: sie ist etwas Reales, etwas ebenso Reales wie die Energie, und sie ist das Reale, an welches allein die Energie gebunden sein kann. Beides, Energie und Masse, sind das Unwandelbare in der Erscheinungen Flucht. Dabei ist beim Aufbau einer allgemeinen Erkenntnislehre von der Energie als dem Primären auszugehen, da ja die Masse als Größe erst aus besonderen Verlagerungen der Energie erschlossen ist. Aus diesen beiden Fundamentalgrößen könnte man dann versuchen, die Geschwindigkeit abzuleiten. Jedoch läßt sich dieser Weg vermeiden, da mit der Grunderkenntnis, daß jede Änderung des Weltzustandes an eine Verlagerung von Energie gebunden ist, diese Verlagerung aber nur in Raum und Zeit erfolgen kann, sich daraus auch die Vorstellungen des Neben- und Nacheinander unmittelbar ergeben,

so daß aus ihnen die von beiden abhängige Vorstellung der Geschwindigkeit abgeleitet werden kann.

Die vorstehenden Darlegungen sind gegen die Gültigkeit der behandelten Fundamentalanschauungen der jetzt herrschenden Physik gerichtet. Ich hoffe, daß sie das Vertrauen zu deren Richtigkeit erschüttern und dadurch den Leser geneigt machen, meinen Vorstellungen näher zu treten. Wenn dann auch der Erfolg, ihn für diese zu gewinnen, ausbleiben sollte, so vertraue ich doch darauf, wenigstens den Zweifel an der alten Lehre zu wecken. Der Zweifel ist aber der beste Schrittmacher für eine kommende neue und bessere Grundlage der Physik.

157 Zum Schlusse möchte ich noch auf einen besonderen Punkt aufmerksam machen, da ich dazu im Laufe meiner Darlegungen keine geeignete Stelle gefunden habe. Die osmotischen und galvanischen Erscheinungen sowie die Vorgänge bei der Lösung von Salzen beruhen nach meiner Ansicht alle darauf, daß sich die Träger mehrerer Energien zusammenlagern, um einen Träger mit gehäufter Energie zu bilden. Der Überschuß dieser gehäuften Energie über diejenige der Nachbarenergieen ist frei und bewirkt durch ihren Abfluß eine Änderung des Naturzustandes bis zur Herstellung eines neuen Energiegleichgewichts. Diese Änderung nennen wir Arbeit. Diese besondere Art, Energie zu verlagern, ist die Grundbedingung für die Existenz der Organismen; ohne sie würden sich die jetzigen Organismen überhaupt nicht haben entwickeln können. Sie ist daher als eine neue fundamentale Erkenntnis anzusehen. Diese als richtig zu begründen oder als falsch zurückzuweisen, muß das Bestreben der Wissenschaft sein; über sie stillschweigend zur Tagesordnung überzugehen, ist ihr nicht gestattet.

Ist mein Gedanke richtig, so wird man die freien Energien in zwei Gruppen teilen können, in solche, die unmittelbar durch die Elektronen von der Sonne zu uns übertragen werden und durch ihren Ablauf bis zur Gewinnung eines neuen Energiegleichgewichts die Änderungen auf der Erde hervorrufen, und in solche, die durch Berührung mit anderen gleichfalls im Energiegleichgewicht stehenden Energien aus diesem Energiegleichgewicht herausgebracht werden und durch Konzentration mehrerer Energien auf einen Träger freie Energie entwickeln. Daß diese Bildung freier Energie bei Begründung der Energievorstellung nicht gleich richtig erfaßt worden ist, ist wohl zu verstehen, da die Energievorstellung bisher überhaupt nicht ganz klar gewesen ist. Es ist aber bezeichnend, wenn auch verständlich, daß gerade diejenigen Erscheinungen, die auf der Bildung dieser zweiten freien Energie beruhen, auch diejenigen sind, über die die geringste Aufklärung gewonnen ist, über die sogar der große Helmholtz trotz seiner alles umspannenden Geisteskraft keinen Fortschritt bringen konnte. Es mußte erst eine Zeit kommen, in der die Lehren auf diesem Gebiete ausgedehnt wurden, so daß eine Kritik einsetzen konnte. Vielleicht hat mancher Leser geglaubt, daß mein Aufsuchen der Gedankenfehler van't Hoffs und anderer überflüssig gewesen sei, wie es in den ersten vier Abschnitten durchgeführt worden ist. Aber ohne diese gerade nicht sehr erfreuliche Arbeit der Kritik hätte ich nicht beim Leser die Grundlage des Verständnisses für meine Auffassung finden können. Daß der Ort der Erde, wo sich die einfachsten Organismen bilden konnten, die warme See mit ihren Salzlösungen ist, ist schon lange vermutet und aus bestimmten Tatsachen erschlossen worden. Aber daß dort die Bedingungen für die Bildung freier Energie günstiger als an anderen Stellen sind, ist bis jetzt nicht zum Bewußtsein der Wissenschaft gekommen. Die neue Auffassung dürfte jetzt manchen Fortschritt in der Erkenntnis bringen.
